L'avventura dei raggi X: da Röntgen a ELETTRA

A cento anni dalla scoperta, la tecnologia dei raggi X è in una fase di rapida espansione e ha raggiunto prestazioni che, per brillanza e coerenza, sono paragonabili a quelle dei laser

di Giorgio Margaritondo, Adolfo Savoia e Albin Wrulich

I raggi X sono impiegati in campo medico, scientifico e tecnologico da oltre un secolo, eppure di essi si sa ancora troppo poco. Questo è vero non solo per il pubblico in generale, ma anche per gli specialisti: molti radiologi ignorano l'esistenza di sorgenti di raggi X mille miliardi di volte più intense degli apparecchi che essi utilizzano. E parecchi ricercatori non sanno che la collimazione e la coerenza di tali sorgenti stanno divenendo praticamente pari a quelle dei laser.

Non meglio conosciuta è la vasta gamma di applicazioni dei raggi X, che si estende ben oltre la radiologia: essi non solo ci consentono d'indagare la struttura microscopica della materia condensata e di comprendere i meccanismi che ne determinano le proprietà, ma ci forniscono i mezzi per sfruttare nel miglior modo possibile queste proprietà ai fini delle applicazioni pratiche alla base della tecnologia industriale.

La mancanza d'informazione è in parte dovuta alla rapidissima evoluzione tecnica: dalla fine degli anni sessanta la brillanza delle sorgenti di raggi X - un indicatore della qualità della luce emessa che definiremo meglio più avanti - è aumentata di ben 13 ordini di grandezza, cioè in media di un fattore 10 ogni due anni e quattro mesi. Di conseguenza, l'analisi di un campione che avrebbe richiesto alcuni giorni negli anni sessanta-settanta avviene ora in secondi o frazioni di secondo.

L'Italia svolge un ruolo di protagonista in questa affascinante avventura: partecipa all'European Synchrotron Radiation Facility (ESRF) di Grenoble e ha finanziato e costruito la sorgente ELETTRA a Trieste nell'ambito di un progetto diretto da Carlo Rubbia, mettendo a disposizione della ricerca internazionale uno dei due laboratori più avanzati del mondo di raggi X «molli» (raggi X di lunghezza d'onda compresa grosso modo tra 0,5 e 100 nanometri).

Le proprietà dei raggi X

L'importanza dei raggi X risiede nella loro caratteristica lunghezza d'onda, che è confrontabile con la dimensione della struttura microscopica degli oggetti che ci circondano. Questo fa sì che i raggi X si comportino come un microscopio capace di «osservare» strutture delle dimensioni di alcuni nanometri, utilissimo per l'analisi della materia su scala atomica. Sappiamo che per studiare strutture microscopiche occorrono lunghezze d'onda, grossolanamente parlando, non più grandi delle loro dimensioni. Applichiamo ora questa regola ai piani atomici di un cristallo; come descrive la finestra nella pagina a fronte, le distanze fra i singoli piani atomici sono dell'ordine di alcuni decimi di nanometro: si può quindi effettuare una misurazione della distanza interatomica utilizzando i raggi X. La tecnica corrispondente, detta cristallografia a raggi X, svolge un ruolo centrale nella scienza moderna: essa venne per esempio impiegata nella determinazione di strutture come quelle del DNA o dell'insulina (si veda l'articolo *Biologia strutturale degli enzimi* pubblicato sul numero di gennaio di «Le Scienze»).

Le misure geometriche microscopiche non esauriscono il ruolo dei raggi X nella ricerca. Essi sono anche utilissimi per analizzare le proprietà fisico-chimiche determinate dai legami fra gli atomi di una sostanza. Vediamo per esempio come l'assorbimento di onde elettromagnetiche (di cui anche i raggi X fanno parte) da parte della materia sia determinato dall'energia della radiazione, analizzando un paio di esempi tratti dalla nostra esperienza quotidiana. Quando ci esponiamo al sole, l'assorbimento dei suoi raggi può produrre tanto il riscaldamento quanto l'abbronzatura. Il riscaldamento è causato principalmente dalla componente infrarossa dei raggi solari, mentre l'abbronzatura è prodotta da quella ultravioletta. Ciò è dovuto alla differenza d'energia fra i fotoni infrarossi e quelli ultravioletti. L'energia di un fotone (o quanto di luce) è $h\nu$, ove h è la costante di Planck ($6,6 \times 10^{-34}$ joule/secondo), e ν è la frequenza dell'onda. Essendo $\nu = c/\lambda$ (dove c è la velocità della luce, 3×10^8 metri/secondo), all'accorciarsi della lunghezza d'onda l'energia del fotone aumenta. Poiché le lunghezze d'onda ultraviolette - meno di 400 nanometri - sono molto inferiori a quelle infrarosse, i fotoni ultravioletti hanno molta più energia di quelli infrarossi. Quando un'onda è assorbita, i fotoni ultravioletti possono rompere i legami chimici fra gli atomi nella materia condensata, il che rende possibile, per esempio, il processo chimico dell'abbronzatura. I fotoni infrarossi, invece, hanno in genere energia troppo bassa per rompere i legami chimici, e si limitano ad aumentarne le vibrazioni, cioè a «riscaldare».

Le lunghezze d'onda dei raggi X sono ancora più piccole di quelle della luce ultravioletta, e quindi le energie dei loro fotoni sono ancora più grandi. Ciò li rende perfettamente in grado sia di spezzare sia di «sondare» i legami chimici, rivelandone i più piccoli dettagli.

I raggi X, in breve, posseggono le lunghezze d'onda e le energie fotoniche più efficaci per l'analisi dei legami chimici e delle strutture microscopiche, i quali a loro volta sono alla base della stragrande maggioranza delle proprietà fondamentali dei materiali d'interesse per la scienza e per la tecnologia. Questo spiega tanto l'importanza dei raggi X quanto l'enorme sforzo messo in atto - spesso con risultati spettacolari - per migliorare le prestazioni delle sorgenti.

Cortesia Sincrotrone Trieste

Veduta panoramica di parte dell'area di ricerca di Padriciano, sopra Trieste, che ospita numerosi centri e istituti. Qui sopra, l'edificio del sincrotrone ELETTRA con i laboratori dedicati ai diversi esperimenti.

Cristallografia a raggi X

Per misurare la distanza interatomica di un cristallo (*d*) occorre una «luce» con lunghezza d'onda confrontabile con le dimensioni della struttura atomica. Infatti i fronti d'onda riflessi da due piani consecutivi (1 e 2) si sommano se la differenza dei loro cammini (ABC) è un multiplo intero *n* della lunghezza d'onda λ. Con una semplice costruzione geometrica si ottiene sin $\mu = n\lambda/2d$. Poiché il seno non può avere valore assoluto maggiore dell'unità, la minima distanza investigabile è $n\lambda/2$. Per investigare un dettaglio strutturale occorre, grossolanamente parlando, una lunghezza d'onda più piccola della sua grandezza.

La relatività al lavoro

Come dovrebbe essere una sorgente ideale di raggi X? Il miglior riferimento è un laser, cioè un emettitore di luce basato sul fenomeno dell'emissione stimolata, le cui caratteristiche rilevanti sono: l'alta intensità, la dimensione ridotta della superficie emittente, la collimazione (cioè la concentrazione della luce entro un piccolo angolo solido) e la coerenza. In realtà una normale sorgente di raggi X usata in radiologia - cioè un materiale (anodo) che emette raggi X quando viene bombardato da elettroni - non possiede alcuna di queste proprietà. Per esempio, l'emissione avviene in tutte le direzioni e va quindi in gran parte sprecata anziché essere convogliata sulla zona di utilizzo.

Esistono però sorgenti di raggi X che, pur non essendo laser, ne riproducono le caratteristiche salienti: sono le

Interno del LINAC, l'acceleratore che inietta gli elettroni nell'anello di accumulazione.

Cortesia Sincrotrone Trieste

sorgenti di luce di sincrotrone. La luce di sincrotrone è costituita dalle onde elettromagnetiche emesse da un fascio di elettroni che circola a una velocità prossima a quella della luce in un acceleratore di particelle quale, per esempio, un anello d'accumulazione.

Lo schema generale di una sorgente moderna di luce di sincrotrone è mostrato in queste due pagine. Vi è rappresentato un iniettore, che preaccelera elettroni e li invia raggruppati in «pacchetti» nella ciambella metallica sotto ultravuoto (pressione da un decimiliardesimo a un centomiliardesimo di millesimo di atmosfera), entro la quale essi continuano a circolare per oltre un giorno, grazie a magneti che ne curvano la traiettoria con un'accelerazione centripeta.

Una particella carica come l'elettrone, sottoposta ad accelerazione, emette onde elettromagnetiche. La conseguente perdita d'energia e di velocità degli elettroni deve dunque essere compensata per permettere alle particelle di continuare a circolare nella ciambella: a ogni giro gli elettroni incontrano infatti una «cavità a radiofrequenza» che ripristina l'energia perduta.

Le onde emesse sono dette luce di sincrotrone perché furono studiate per la prima volta, negli anni cinquanta e sessanta, in acceleratori del tipo sincrotrone. Nell'analizzarne le proprietà, occorre tenere conto di un fatto importante: la velocità degli elettroni è prossima a quella della luce. Questo fa sì che il fenomeno d'emissione sia sottoposto alle leggi della relatività e che le sue caratteristiche non possano essere comprese senza farvi riferimento.

La teoria della relatività rende conto di due fatti: prima di tutto, le lunghezze d'onda della luce di sincrotrone cadono principalmente nell'intervallo spettrale dei raggi X; in secondo luogo, l'emissione non è dispersa in tutte le direzioni, ma concentrata nel piano della ciambella, entro un piccolissimo angolo; il sincrotrone si rivela quindi un'eccellente sorgente di raggi X.

Queste proprietà, e le successive utilizzazioni della luce di sincrotrone, hanno stimolato un'evoluzione tecnica che, in trent'anni, ha prodotto tre generazioni di sorgenti, arrivando infine alle caratteristiche record di ELETTRA e delle altre sorgenti di terza generazione quali Berkeley (ALS) e Grenoble (ESRF). Per comprendere come una generazione di sorgenti superi quella precedente, dobbiamo esaminare il fenomeno relativistico d'emissione della luce di sincrotrone. Anziché considerare i magneti «deflettenti», baseremo l'analisi sui dispositivi più avanzati che caratterizzano le macchine di terza generazione, i cosiddetti ondulatori o *wiggler*. Il principio, illustrato a pagina 36, è semplice: anziché accontentarsi dell'emissione di un solo magnete, se ne usano parecchi in serie. Gli elettroni si muovono su una traiettoria a zig-zag emettendo luce a ogni deflessione: in questo modo la linea di luce raccoglie e utilizza un'emissione molto più intensa di quella di un singolo magnete deflettente.

Schema di un laboratorio di luce di sincrotrone. Le fotografie mostrano alcune parti di ELETTRA: *1)* iniettore, *2)* linea di luce, *3)* camera sperimentale della linea di fotoemissione nell'ultravioletto spinto, *4)* linea di microspettroscopia.

Cortesia Sincrotrone Trieste

La lunghezza d'onda emessa è intuitivamente legata al periodo spaziale L della serie di magneti. Qui, però, cadiamo in un apparente paradosso: mentre L è di alcuni centimetri - la lunghezza delle onde radio - l'emissione è costituita da raggi X, con lunghezze d'onda di decimi di miliardesimo di metro.

Come si risolve questo paradosso? Bisogna immaginare d'osservare la serie di magneti non dal punto di vista del laboratorio, ma da quello degli elettroni in moto. Essi la «vedono» muoversi verso di loro a una velocità vicina a quella della luce, il che causa un'apparente diminuzione di L per il fenomeno relativistico della contrazione di Lorentz.

In prima approssimazione, l'entità della contrazione è data dal fattore gamma, $\gamma = E/m_oc^2$, dove E è l'energia (relativistica) di moto degli elettroni e m_oc^2 è l'energia di Einstein, legata alla massa a riposo m_o dell'elettrone. Prendendo come esempio ELETTRA, che può funzionare con un'energia di 1,5-2,0 GeV (1 GeV o gigaelettronvolt è pari a circa 1,6 decimiliardesimi di joule), il fattore gamma è 3000-4000, e il periodo L/γ «visto» dagli elettroni è di alcune decine di micrometri.

Sottoposti all'azione della serie di magneti, ciascuno degli elettroni oscilla ed emette luce di sincrotrone. La lunghezza d'onda, dal punto di vista degli elettroni, è pari al periodo che essi «vedono», cioè L/γ. Un altro fenomeno relativistico, tipico delle sorgenti d'onda in movimento e noto come effetto Doppler, riduce per l'osservatore del laboratorio la lunghezza d'onda della luce di un'ulteriore quantità - circa 2γ - lungo la direzione di moto della sorgente. Quindi, la lunghezza d'onda della luce di sincrotrone è pari al periodo della serie di magneti, contratto a causa dell'azione combinata dei due fattori relativistici, che danno globalmente un fattore di circa $(1/\gamma)(1/2\gamma) = 1/2\gamma^2$. Nel caso di ELETTRA, tale fattore varia da 18 a 32 milioni: ecco come, sfruttando la relatività, il periodo macroscopico L può essere convertito nelle lunghezze d'onda microscopiche dei raggi X.

La relatività spiega anche la collimazione angolare della luce di sincrotrone. Immaginiamo un elettrone che emette luce di sincrotrone sotto l'azione di una serie di magneti. A causa dell'alta velocità degli elettroni, dal punto di vista del laboratorio le onde emesse appaiono «proiettate in avanti», cioè l'emissione tende a concentrarsi intorno alla direzione del moto. Questo è un fenomeno comune, rilevabile per esempio per il clacson di un'auto in moto; tecnicamente parlando, si tratta di un altro aspetto dell'effetto Doppler.

A causa della relatività, la proiezione in avanti è però molto più accentuata per la luce di sincrotrone che per le onde sonore del clacson, e l'emissione è quasi tutta concentrata entro un angolo $1/\gamma$ (espresso in radianti) rispetto alla direzione di moto dell'elettrone. Sempre nel caso di ELETTRA, quest'angolo corrisponde a 0,014-0,019 gradi: in pratica, ogni singolo elettrone si comporta come una «torcia elettrica» così fortemente collimata da essere simile a un laser.

Questo comportamento ha una serie di conseguenze interessanti che possono essere comprese osservando lo schema di queste pagine, in cui le linee di luce sono predisposte per raccogliere l'emissione degli elettroni e convogliarla verso le camere sperimentali di utilizzazione. Le linee di luce sono posizionate in modo da raccogliere la luce emessa dal singolo elettrone ogni volta che esso passa per il magnete deflettente che ne causa l'accelerazione. Nel caso di un singolo magnete, la linea «vedrà» un rapido impulso di luce per ogni giro dell'elettrone intorno all'anello. La rapidità degli impulsi ha una conseguenza importante: le lunghezze d'onda emesse devono essere disperse su un'ampia banda spettrale.

Una legge generale dei fenomeni fi-

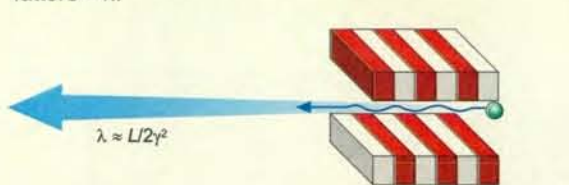
sici, il cui caso più noto è il principio di indeterminazione di Heisenberg, pone in relazione coppie di variabili, dette coniugate in quanto non possono essere determinate entrambe simultaneamente con precisione piccola a piacere. La lunghezza Δt dell'impulso di luce e la larghezza $\Delta\lambda$ della banda di lunghezze d'onda emesse sono appunto variabili coniugate, e un impulso brevissimo corrisponde a una banda di lunghezze d'onda molto ampia.

Questa banda estesa trova un'importante applicazione pratica nel caso della luce di sincrotrone. Ogni specifica lunghezza d'onda necessaria a una determinata utilizzazione può essere ottenuta selezionandola (mediante speciali dispositivi di filtraggio, detti monocromatori) dall'ampia banda emessa da un magnete deflettente. Questa tecnica ha fornito luce di sincrotrone per la maggior parte delle linee di luce delle sorgenti di prima e seconda generazione. Nelle sorgenti di terza generazione si utilizzano invece, principalmente, i dispositivi tipo ondulatore (già citati per quanto concerne il rapporto fra periodo e lunghezza d'onda) e wiggler, che sono costituiti da serie periodiche di magneti che costringono l'elettrone a seguire una traiettoria a zig-zag.

Nel caso di un wiggler, lo zig-zag è piuttosto accentuato, e ciascuno degli elettroni-torcia elettrica fornisce alla linea corrispondente una serie di brevi impulsi di luce a ogni passaggio. Il vantaggio rispetto a un singolo magnete deflettente è che la linea di luce riceve diversi impulsi di luce a ciascun passaggio dell'elettrone, anziché uno solo.

Negli ondulatori, il campo magnetico, debole rispetto a quello di un wiggler, può solo produrre piccolissime oscillazioni a zig-zag. La deflessione è così piccola che l'elettrone-torcia elettrica illumina la linea di luce senza interruzioni: non si ha più una serie di brevi impulsi, ma un solo lungo impulso. Scompare quindi l'emissione a larga banda di lunghezze d'onda, e tutta la luce è concentrata intorno alla lunghezza d'onda $\lambda \approx (L/2\gamma^2)$.

Questa concentrazione, combinata con l'alto numero di elettroni circolanti nell'anello, produce intensità record per quanto concerne l'emissione di raggi X.

Le caratteristiche d'alto flusso e di collimazione angolare della luce di sincrotrone possono essere sintetizzate utilizzando il concetto di brillanza, una grandezza che è proporzionale al rapporto tra il flusso luminoso e il prodotto tra la superficie emittente della sorgente e l'angolo solido entro il quale ha luogo l'emissione. Se confrontiamo la brillanza di una lampadina con quella di un laser, ci accorgiamo subito che la lampadina può in taluni casi avere un più alto valore di flusso, ma il laser, avendo valori di superficie emittente e di angolo solido molto più piccoli, produce una brillanza complessivamente più elevata.

La brillanza della luce di sincrotrone è determinata sia dall'alto flusso sia dalle caratteristiche geometriche (come abbiamo detto, l'emissione è collimata entro un angolo $1/\gamma$). Ma questo non è sufficiente a garantire un'elevata brillanza: le leggere differenze nella traiettoria degli elettroni nell'anello d'accumulazione aumentano in pratica la dimensione della superficie emittente S. Se le differenze di traiettoria sono eccessive, S è grande e la brillanza piccola. Inoltre, le differenze di traiettoria portano gli elettroni a deviare angolarmente l'uno rispetto all'altro, e ciò aumenta la divergenza angolare dell'emissione oltre il valore intrinseco $1/\gamma$, facendo diminuire di nuovo la brillanza.

Nello sviluppare ELETTRA e le altre macchine di terza generazione è stato fatto uno sforzo enorme per minimizzare queste deviazioni di carattere geometrico, riuscendo a controllare il moto degli elettroni con estrema precisione. Gli elettroni circolano nella ciambella di ELETTRA, che è lunga oltre 259 metri, senza deflettere l'uno rispetto all'altro di più di qualche millesimo di millimetro. Questa spettacolare precisione e l'uso di ondulatori hanno prodotto un grandissimo aumento di brillanza, come mostra il grafico a fianco. Si osservi che la scala verticale di questa figura è logaritmica: l'aumento di brillanza negli ultimi dieci anni è almeno di quattro ordini di grandezza. In tal modo, le sorgenti di luce di sincrotrone stanno avvicinandosi a quelle di tipo laser.

Ciò è vero non solo per la brillanza, ma anche per la coerenza, la proprietà di due raggi luminosi di avere un rapporto fra le fasi ben definito e fissato e responsabile di fenomeni d'interferenza o diffrazione quali gli ologrammi.

Possiamo estendere questa definizione a una sorgente d'onde elettromagnetiche di lunghezza d'onda λ dicendo che è «spazialmente coerente» se il prodotto della sua dimensione geometrica e della sua divergenza angolare è sufficientemente piccolo rispetto a λ.

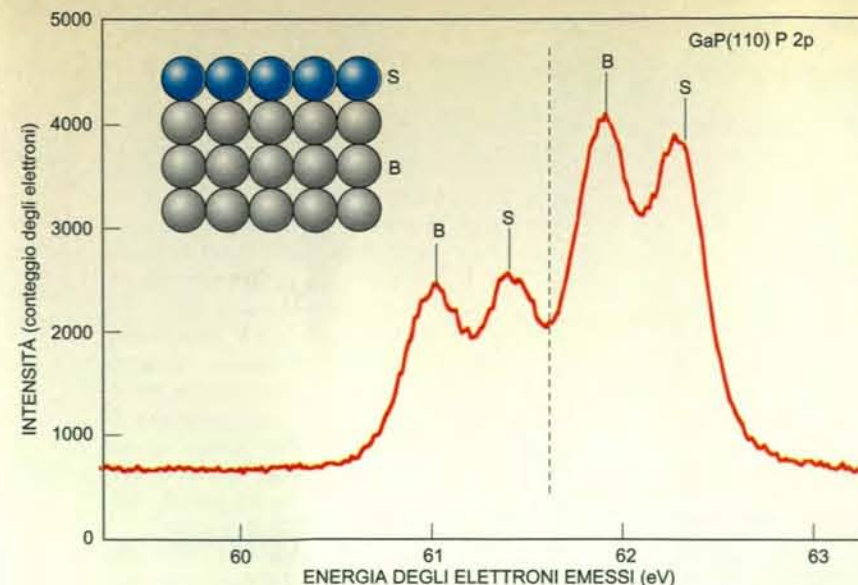
È chiaro che all'aumento di brillanza delle sorgenti di terza generazione, causato dalla diminuzione della superficie emittente e della divergenza angolare, corrisponde anche un aumento di coerenza. Ancora una volta, si può constatare che le sorgenti di luce di sincrotrone stanno sempre più assomigliando a dei laser. Sino a che punto? Questo è un dato tanto spettacolare quanto poco conosciuto: la frazione di coerenza di ELETTRA è dell'ordine del 100 per cento fino a lunghezze d'onda (ultraviolette) di circa 100 nanometri, e rimane alta anche a lunghezze d'onda inferiori, cioè per i raggi X.

Alto flusso, brillanza, coerenza sono le caratteristiche tipiche di un laser, ma - come abbiamo visto - anche della luce di sincrotrone. In pratica, quindi, sorgenti paragonabili ai laser a raggi X sono già disponibili, dato che le prestazioni corrispondenti sono in gran parte fornite dalle macchine di luce di sincrotrone di terza generazione.

Come funziona un ondulatore

Un elettrone viaggia verso un ondulatore a una velocità v prossima a quella della luce: a causa della relatività, esso «vede» il periodo L dell'ondulatore accorciarsi di un fattore $\approx \lambda$.

L'ondulatore obbliga l'elettrone a muoversi sinusoidalmente, emettendo luce di sincrotrone con lunghezza d'onda pari al suo periodo (accorciato) $\approx L/\gamma$. A causa del moto dell'elettrone (effetto Doppler), dal punto di vista del laboratorio la lunghezza d'onda appare ulteriormente accorciata di un fattore $\approx 2\gamma$.

Aumento di brillanza delle sorgenti di raggi X a partire dall'inizio del secolo fino all'introduzione delle sorgenti di terza generazione come ELETTRA.

Spettri di fotoemissione, cioè curve di distribuzione in energia degli elettroni emessi per effetto fotoelettrico da un campione del semiconduttore fosfuro di gallio. I picchi sono le «impronte digitali» degli atomi di fosforo, tanto di quelli della superficie (S) del campione quanto di quelli situati in profondità (B). I due spettri (separati dalla linea tratteggiata) sono stati ottenuti da Paolo Perfetti, Kevin Prince, Claudio Quaresima e collaboratori bombardando il campione con fotoni di raggi X di due diverse energie. Si noti che variando l'energia del fotone si può modificare l'importanza relativa dei contributi S e B. Qui sopra, analisi di una reazione chimica in tempo reale: le curve di distribuzione in energia dei fotoelettroni (analoghe a quelle della figura a fianco) rivelano l'evoluzione nel tempo dello stato chimico del sistema studiato, in questo caso una superficie di rodio ricoperta di monossido di carbonio. L'evoluzione nel tempo riflette il progressivo riscaldamento del campione. I dati, in corso di pubblicazione, sono stati ottenuti da Giovanni Comelli, Giorgio Paolucci, Renzo Rosei e collaboratori.

Centinaia di utilizzazioni, migliaia di utilizzatori

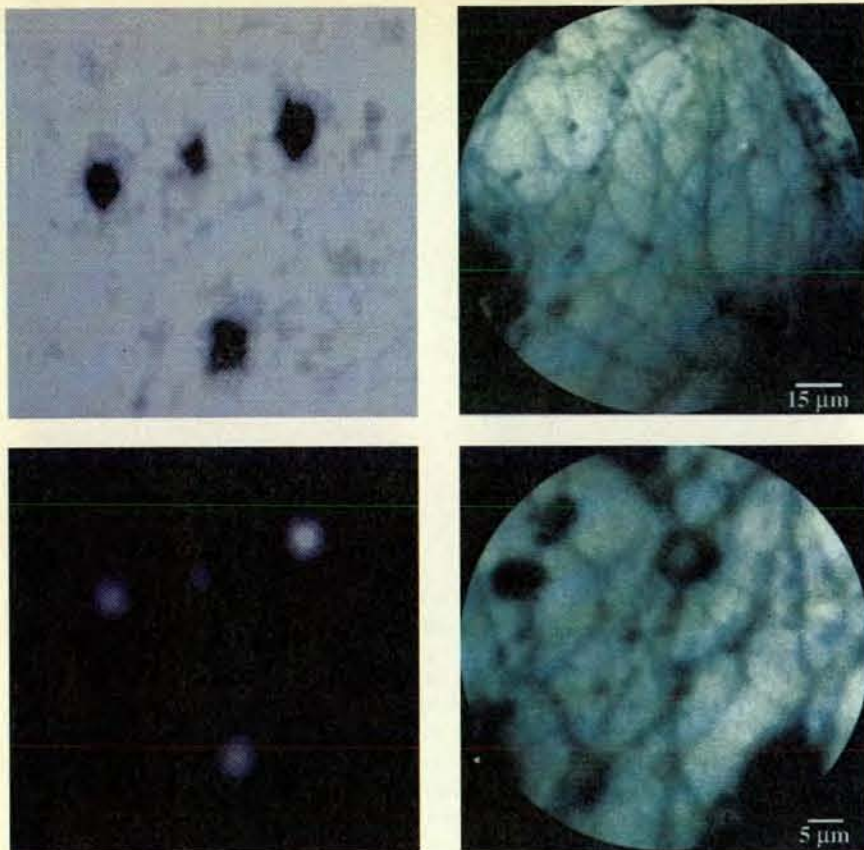
I raggi X e ultravioletti emessi da una sorgente di luce di sincrotrone costituiscono l'ingrediente principale di una lunga serie di tecniche sperimentali e di applicazioni tecnologiche, in una moltitudine di campi che vanno dalla medicina alla fisica, dalla chimica alla microfabbricazione, dalla scienza dei materiali alle scienze della vita.

Intorno alle varie linee di luce che si diramano dalla ciambella principale di un laboratorio di luce di sincrotrone come ELETTRA operano decine e decine di ricercatori. Ciascuna linea riceve i raggi X dalla sorgente e li convoglia verso una particolare camera di utilizzazione; le linee lavorano simultaneamente, perché i raggi X e ultravioletti di ELETTRA sono estremamente preziosi e non vanno sprecati.

In alcune linee di ELETTRA, si bombardano materiali con raggi X e li si costringe a emettere alcuni dei loro elettroni, che sono direttamente o indirettamente coinvolti nella formazione di legami chimici. Gli elettroni fuoriusciti «ricordano» ancora le proprietà dei legami, e possono quindi essere utilizzati per esplorarne la struttura grazie alla tecnica chiamata spettroscopia di fotoemissione.

La figura in alto a sinistra mostra la distribuzione in energia degli elettroni emessi da un campione del semiconduttore fosfuro di gallio (GaP), bombardato con raggi X di ELETTRA. I picchi di tale curva sono le «impronte digitali» del fosforo, uno degli elementi chimici che costituiscono il materiale, e consentono sia di provarne la presenza sia di studiarne le proprietà specifiche in questo particolare composto. Il grafico mette bene in evidenza la potenza di ELETTRA: è facile distinguere i diversi picchi della curva, che riflettono la differenza fra gli atomi di fosforo della parte profonda del composto (B) e quelli della superficie (S). Si distinguono quindi le proprietà di atomi differenti che distano fra loro non più di alcuni decimi di nanometro.

Prima che ELETTRA entrasse in funzione, eseguire misure come queste richiedeva parecchi minuti; ora, bastano solo pochi secondi (e presto sarà sufficiente una frazione di secondo). Invece di prendere una «fotografia chimica» statica del campione, si può prendere una sequenza di istantanee, cioè un «film chimico» che rivela l'evoluzione dinamica del campione. Questa tecnica, di cui la figura in alto a destra fornisce un esempio, è utilissima per studiare reazioni chimiche, in particolare quelle d'interesse industriale. Ad esempio, i film chimici di ELETTRA possono chiarire - e quindi migliorare dal punto di vista dell'efficienza - i processi di passivazione, cioè le reazioni chimiche che rendono le superfici degli oggetti resistenti all'azione degli agenti esterni. Ma le analisi effettuate da ELETTRA si dimostrano utili anche per controllare processi di catalisi e di fabbricazione di microcircuiti.

La versione microscopica della spettroscopia di fotoemissione trasporta il potere analitico dei raggi X sulla scala di un decimillesimo di millimetro. La figura in alto a sinistra, nella pagina successiva, mostra due esempi di mi-

Le due immagini a sinistra, ottenute da Maya Kiskinova, Marino Marsi e collaboratori, rivelano la distribuzione microscopica dell'argento in un campione costituito da un substrato di silicio ricoperto prima con oro e poi con argento. Le immagini mostrano la diversa distribuzione sulla superficie di atomi d'argento in due stati chimici differenti: argento metallico e argento legato chimicamente al silicio. A destra, due micrografie fotoelettroniche di un reticolo di cellule neuronali interconnesse, ottenute da Gelsomina De Stasio, Yeukuang Hwu e collaboratori presso il Synchrotron Radiation Research Center di Hsinchu, Taiwan.

crofotografie chimiche nelle quali il contrasto deriva non dalle caratteristiche geometriche del campione, ma da quelle chimiche. Le due immagini rivelano la distribuzione microscopica dell'argento in un campione non omogeneo contenente, oltre a questo elemento, anche oro e silicio. Le fotografie rappresentano atomi d'argento in due stati chimici diversi: argento metallico e argento legato chimicamente al silicio. Si noti l'inversione di contrasto: essa dimostra che la distribuzione dell'argento è radicalmente differente per i due stati chimici e costituisce un ottimo esempio delle analisi chimiche avanzate che possono essere effettuate con questa tecnica a livello microscopico.

La parte destra della stessa figura mostra un'applicazione in campo biologico. Ripresa alla sorgente di luce di sincrotrone di Hsinchu a Taiwan (una macchina con caratteristiche non distanti da quelle di ELETTRA) da ricercatori italiani, svizzeri, americani e cinesi, la microfotografia mostra le cellule e le interconnessioni di un reticolo di neuroni. Il contrasto visivo riflette in gran parte la microcomposizione chimica del campione. Si può allora comprendere perché questa tecnica sia già largamente usata per analizzare gli elementi tossici prodotti dall'inquinamento nei sistemi neuronali.

Altrettanto affascinante è l'impiego dei raggi X di ELETTRA per esplorare le proprietà strutturali. La figura nella pagina a fronte illustra schematicamente una delle strutture cristalline che ELETTRA ha recentemente contribuito a risolvere: un sistema macromolecolare, il fattore di elongazione, nell'atto di interagire con altre molecole. Questo fattore controlla la biosintesi delle proteine nei ribosomi ed è importante, per esempio, per comprendere il meccanismo di funzionamento di svariati antibiotici.

A questo proposito non si può dimenticare il largo uso dell'analisi strutturale con luce di sincrotrone da parte dell'industria farmaceutica. È nota la difficoltà di sviluppare farmaci in grado di bloccare l'azione dei virus, da quelli del comune raffreddore a quelli che causano l'AIDS. Una recente strategia utilizza nuove sostanze la cui struttura imita in parte quella del virus, e ne può quindi neutralizzare le funzioni. Ma per ottenere un nuovo farmaco bisogna analizzare un numero enorme di strutture atomiche e in questa ricerca la luce di sincrotrone svolge un ruolo sempre più fondamentale, in quanto è in grado di risolvere strutture di campioni cristallini estremamente piccoli, i soli spesso ottenibili.

Nel settore della produzione industriale i raggi X trovano un campo di applicazione particolarmente adatto. Per esempio, i microcircuiti elettronici integrati, che influenzano così profondamente la nostra vita quotidiana, sono fabbricati con la litografia a raggi ultravioletti, una tecnologia che consente di compattare milioni di dispositivi entro un millimetro quadrato. Si tratta di una tecnica di natura fotografica, che impiega però i raggi ultravioletti anziché la luce visibile: la lunghezza d'onda troppo elevata di quest'ultima non consentirebbe infatti l'estrema miniaturizzazione degli attuali circuiti integrati.

La luce di sincrotrone consente di sostituire i raggi ultravioletti con i raggi X, di lunghezza d'onda ancora inferiore. Oltre alla miniaturizzazione più spinta, i raggi X offrono un altro importantissimo vantaggio: la loro capacità di penetrazione consente di ottenere stampi piccolissimi, dai quali si possono ricavare componenti meccanici su una scala microscopica. Le figure in basso nella pagina a fronte ne forniscono un esempio: si tratta degli stampi di una microturbina e di un microingranaggio, le cui dimensioni non superano 150 micrometri, fabbricati dai ricercatori di ELETTRA in collaborazione con i colleghi di Karlsruhe e della società Micromore.

Tornando al campo di applicazione più tradizionale dei raggi X, la radiografia, si deve ricordare che si stanno perfezionando metodi per utilizzare i raggi X nella diagnosi sistematica delle malattie coronariche o del cancro del seno.

L'INFN, l'Università di Trieste ed ELETTRA stanno collaborando in questo campo, sviluppando una nuova tecnica radiografica per la diagnosi precocissima dei tumori della mammella con una dose ridotta di raggi X (si veda la finestra *ELETTRA è già al lavoro: la mammografia con il sincrotrone* in «Le Scienze» n. 339, novembre 1996, p.73).

I numerosi impieghi della luce di sincrotrone, che si estendono ben oltre gli esempi qui riportati, generano una domanda di accesso alle sorgenti da parte di un numero grandissimo di utilizzatori. Una domanda che, purtroppo, rimane in gran parte insoddisfatta: per esempio, nel caso di ELETTRA, non si riesce ad accogliere che il 10-30 per cento delle proposte di esperimenti. Se questa forzosa selezione garantisce l'alta qualità scientifica delle utilizzazioni, costringe anche a rinunciare a programmi estremamente validi ed è quindi più che giustificato lo sforzo in corso per costruire nuove linee, in modo da ridurre lo squilibrio fra richiesta e disponibilità.

Stampi di microturbina (*a sinistra*) e di ingranaggio fabbricati con la luce di ELETTRA da Francesco De Bona, Jürgen Mohr e colleghi con tecniche di litografia profonda a raggi X (LIGA), in collaborazione con il Forschungszentrum di Karlsruhe. I primi prodotti della tecnica LIGA - microsensori, microconnettori e dispositivi di filtraggio - saranno in futuro integrati sulla stessa scala con componenti microelettronici.

UN'AVVENTURA CHE NON ACCENNA A FINIRE

Le sorgenti di raggi X stanno progredendo così rapidamente che è legittimo chiedersi se questo progresso sia destinato a esaurirsi. La risposta non può che essere negativa per due motivi. Innanzitutto la tecnologia stessa delle sorgenti di raggi X non ha ancora raggiunto i suoi limiti naturali e già si intravvede la possibilità di aumentarne ulteriormente la brillanza e la coerenza. Un progetto in tal senso è stato concepito dalla Svizzera, e i suoi principi sono stati ripresi da Francia, Cina e Giappone. In secondo luogo, esiste una nuova direzione di sviluppo in cui ELETTRA opera attivamente: quella dei laser a elettroni liberi, che trasporta nel campo dei laser la tecnologia degli acceleratori propria della luce di sincrotrone.

I laser a elettroni liberi (quelli attualmente in uso operano nell'infrarosso, ma si stanno costruendo i primi esemplari funzionanti anche nel visibile e nell'ultravioletto) usano come mezzo attivo gli elettroni che circolano in un acceleratore che, interagendo con una serie periodica di magneti, danno origine a emissione stimolata di radiazione, analogamente a quanto fa il mezzo ottico attivo di un laser convenzionale.

Per sostenere l'emissione di radiazione e ottenere in uscita una luce intensa e coerente, le onde vengono amplificate in una cavità ottica costituita da specchi interamente o parzialmente riflettenti. Il serio problema della realizzazione di un laser a elettroni liberi a raggi X risiede soprattutto nella mancanza di tali specchi, dato che i raggi X non sono riflessi. Si deve quindi fare a meno della cavità ottica, aumentando l'amplificazione da parte del mezzo attivo: occorre cioè che il laser funzioni in modo «super radiante».

ELETTRA è attiva in questo campo con il cosiddetto progetto FERMI (*Free-Electron Radiation and Matching Instrumentation*), che parte dallo sviluppo di laser a elettroni liberi nell'infrarosso, ma prevede nel futuro l'estensione sino ai raggi X. Fra le applicazioni più affascinanti dei laser a elettroni liberi, citiamo il loro uso in chirurgia ultraprecisa, campo nel quale la Vanderbilt University, nel Tennessee, si è posta all'avanguardia.

La tecnologia della luce di sincrotrone e dei raggi X, quindi, sta ancora attraversando un periodo di espansione. Questo fiorire d'attività è un caso praticamente unico nella storia della scienza; in effetti, la maggior parte dei campi di ricerca si esaurisce nel giro di pochi decenni e solo raramente la sopravvivenza si estende oltre il secolo. Al contrario, cent'anni dopo la loro scoperta, i raggi X non solo sopravvivono gagliardamente, ma si trovano addirittura nel periodo più rapido della loro espansione, fornendo per la prima volta prestazioni quali l'altissima brillanza e la coerenza.

Struttura del fattore di elongazione, alla cui risoluzione ha recentemente contribuito ELETTRA con tecniche di diffrazione a raggi X. La risoluzione della struttura contribuisce alla comprensione dei dettagli molecolari del meccanismo di sintesi proteica. (Da un lavoro di Rolf Hilgenfeld, Adolfo Savoia, Gordon Webster e colleghi, in corso di pubblicazione.)

GIORGIO MARGARITONDO è professore ordinario al Politecnico Federale di Losanna e responsabile della Divisione esperimenti di ELETTRA. Ha lavorato al CNR, a Frascati, ai Bell Laboratories e al Synchrotron Radiation Center dell'Università del Wisconsin.

ADOLFO SAVOIA, vicedirettore della Divisione esperimenti di ELETTRA, è stato ricercatore presso i laboratori dell'INFN di Frascati dove ha lavorato su Adone.

ALBIN WRULICH è direttore della Divisione acceleratori di ELETTRA. Ha lavorato presso i laboratori DESY di Amburgo, LBL di Berkeley ed ESRF di Grenoble.

MARGARITONDO G., *Introduction to Synchrotron Radiation*, Oxford, New York, 1988.

DE STASIO G., DUNHAM D., TONNER B. P., MERCANTI D., CIOTTI M. T., PERFETTI P. e MARGARITONDO G., *Application of Photoelectron Spectromicroscopy to a Systematic Study of Toxic and Natural Elements in Neurons*, in «Journal of Synchrotron Radiation» 2, 106, 1995.

MARGARITONDO G., *Synchrotron Light and Free Electron Lasers*, in «Journal of Synchrotron Radiation», 2, 148;1995 e in «Rivista del Nuovo Cimento», 18, 1, 1996.

Lo spettro delle armi biologiche

Stati e gruppi terroristici hanno dimostrato un inquietante interesse per lo sviluppo di arsenali batteriologici. Per scoraggiare possibili attacchi sono necessari controlli internazionali più attenti

di Leonard A. Cole

Un giorno dello scorso anno, colto da un ghiribizzo, domandai a un amico: «Che cosa ti spaventerebbe di più, essere attaccato da un'arma biologica o da un'arma chimica?». Egli rimase un attimo interdetto. «Francamente - rispose - temo di più l'Alzheimer.» E ci facemmo su una risata. Il mio amico aveva elegantemente lasciato cadere la mia domanda come irrilevante. Nelle società civili, la gente non ama soffermarsi su questo tipo di argomenti.

Il giorno seguente, il 20 marzo, veniva liberato gas nervino sarin nella metropolitana di Tokyo, uccidendo 12 persone e intossicandone diverse migliaia. Ciò avveniva nientemeno che in Giappone, uno dei paesi più sicuri al mondo. Chiamai il mio amico e parlammo della coincidenza tra il terribile fatto di cronaca e la mia domanda del giorno precedente. Una fantasticheria apparentemente frivola era diventata da un giorno all'altro un argomento tragicamente serio.

Che nell'attentato di Tokyo i morti non si siano contati a migliaia è stato attribuito alla scarsa purezza dell'agente chimico impiegato. Una gocciolina di sarin, una sostanza sviluppata in Germania negli anni trenta, può uccidere nel giro di pochi minuti per contatto con la pelle o inalazione del vapore. Come tutti gli agenti nervini, il sarin blocca l'azione dell'acetilcolinesterasi, un enzima indispensabile per la trasmissione degli impulsi nervosi.

La setta responsabile dell'attentato, Aum Shinrikyo («Sublime verità») era in procinto di sviluppare anche agenti biologici. Se l'idea di un attacco chimico può terrorizzare, un'arma biologica è il peggiore degli incubi. Mentre gli agenti chimici sono inanimati, batteri, virus e altri agenti patogeni possono riprodursi ed essere trasmessi per contagio; se si stabiliscono nell'ambiente possono moltiplicarsi. A differenza di tutte le altre armi, l'effetto delle armi biologiche può diventare sempre più pericoloso a distanza di tempo dal loro impiego.

Gli agenti biologici possono essere inabilitanti o anche mortali. Il virus Ebola, per esempio, uccide fino al 90 per cento di chi ne è colpito in poco più di una settimana. Il tessuto connettivo del malato si liquefa; ogni orifizio sanguina. Nelle fasi finali della malattia le vittime sono colte da convulsioni e schizzano all'intorno sangue contaminato dal virus.

Per Ebola non è disponibile alcuna terapia. Anche le modalità del contagio sono poco chiare: non è noto se esso avvenga per stretto contatto fisico con una persona infettata, o attraverso il sangue e altri fluidi corporei, o semplicemente respirando l'aria nei pressi del malato. I recenti episodi epidemici nello Zaire hanno fatto imporre la quarantena a intere regioni del paese fino a che la malattia ha arrestato la sua diffusione.

Si prova orrore al pensiero che individui o nazioni prendano in considerazione l'idea di utilizzare virus come questo per un attacco. Nell'ottobre 1992 Shoko Asahara, capo della setta Aum Shinrikyo, e 40 suoi seguaci si erano recati nello Zaire dichiarando di volersi dedicare alla cura delle vittime di Ebola. Ma il reale intento del gruppo era con ogni probabilità di ottenere campioni di virus, per metterli in coltura e utilizzarli in attacchi biologici.

L'interesse nell'acquisizione di organismi assassini per sinistri propositi è documentato da altri inquietanti episodi. Il 5 maggio 1995, sei settimane dopo l'attentato nella metropolitana di Tokyo, Larry Harris, un tecnico di laboratorio dell'Ohio, ordinò il batterio che causa la peste bubbonica alla American Type Culture Collection di Rockville, una società di forniture biomediche del Maryland, che gli inviò per posta tre fiale di *Yersinia pestis*.

Harris suscitò sospetti solo quando, quattro giorni dopo avere effettuato l'ordine, telefonò per sapere come mai i campioni non fossero ancora arrivati. I responsabili della società si stupirono per questa impazienza e per l'evidente scarsa familiarità del cliente con le tecniche di laboratorio, cosicché decisero di mettersi in contatto con le autorità federali. Più tardi si appurò che il personaggio faceva parte di un'organizzazione per la «supremazia bianca». Nel novembre 1995 egli fu condannato da una corte federale per frode postale.

Per ottenere i batteri della peste, Harris aveva avuto bisogno soltanto di una carta di credito e di carta intestata falsa. Sulla scia di questo incidente furono approvate norme antiterrorismo che impongono ai Centers for Disease Control and Prevention di controllare più strettamente gli spostamenti di agenti infettivi.

Che cosa avrebbe fatto Harris di quei batteri? Egli sostenne di voler compiere ricerche per neutralizzare i ratti iracheni infettati con «supergermi». Ma se avesse voluto coltivare un arsenale biologico, il suo compito sarebbe stato spaventosamente semplice. Dividendosi ogni 20 minuti, un singolo batterio dà origine in 10 ore a oltre un miliardo di copie di se stesso. Una piccola colonia di microrganismi può generare un numero immenso di discendenti in meno di una settimana. E per contrarre alcune malattie, come il carbonchio, è sufficiente inalare qualche migliaio di batteri.

Kathleen C. Bailey, già alto funzionario della US Arms Control and Disarmament Agency, ha visitato molte società biotecnologiche e farmaceutiche. Ella si dice «assolutamente convinta» che per realizzare un arsenale biologico di prima grandezza bastino un'attrezzatura del valore di non più di 10 000 dollari e una normale cantina. Dopotutto, si possono coltivare senza grossi rischi mi-

M. Milner, Sygma

Durante la guerra del Golfo del 1991, ai viaggiatori in transito nell'aeroporto di Tel Aviv furono distribuite maschere antigas per difesa in caso di attacco chimico o biologico da parte dell'Iraq.

Patric Robert, Sygma

Le vittime dell'epidemia di Ebola nel 1995 vengono sepolte in una fossa comune a Kikwit, in Zaire. Secondo alcune fonti, il virus è stato preso in considerazione dalla setta Aum Shinrikyo come possibile arma biologica.

gliaia di miliardi di batteri con attrezzature non più sofisticate di un fermentatore per birra, un terreno di coltura a base di proteine, una maschera antigas e una sopravveste di plastica.

Fortunatamente il terrorismo biologico è finora rimasto limitato a pochissimi casi. Un incidente accadde nel settembre 1984, quando circa 750 persone accusarono disturbi dopo avere mangiato in ristoranti di una cittadina dell'Oregon, The Dalles. Nel 1986 Ma Anand Sheela, appartenente a una setta venuta in contrasto con la popolazione locale, confessò a una corte federale di avere, insieme con alcuni correligionari, sparso batteri della salmonella sulle portate di insalata in quattro ristoranti. I batteri erano stati coltivati in laboratori nella fattoria appartenente alla setta. Dopo avere scontato due anni e mezzo di carcere, la Sheela, che era stata principale collaboratrice del capo della setta, il santone Bhagwan Shree Rajneesh, fu rilasciata ed espulsa dal paese.

Ma, come ha indicato anche un rapporto del 1992 dell'Office of Technology Assessment, sia il terrorismo biologico sia quello chimico sono stati rari. Pure raro è stato l'uso di agenti biologici in operazioni belliche. Forse il primo episodio documentato di questo tipo accadde nel XIV secolo quando, durante l'assedio della città di Caffa, in Crimea, furono catapultati cadaveri di soldati morti di peste bubbonica al di sopra delle mura della città (fu questa l'origine della terribile epidemia chiamata «peste nera», che si diffuse in tutta Europa). All'epoca del colonialismo britannico in America, sembra che siano state fatte distribuire tra gli indiani coperte infette provenienti da un'infermeria dove venivano ricoverati malati di vaiolo. Il solo episodio confermato avvenuto nel XX secolo è stato l'uso da parte dei giapponesi, negli anni trenta e quaranta, di vettori della peste e di altre malattie nell'invasione della Cina.

Mentre il nostro secolo si avvia alla conclusione, sta emergendo però uno spiacevole paradosso. Sempre di più sono gli Stati firmatari di accordi internazionali per l'eliminazione delle armi biologiche e chimiche, ma più ancora sono quelli sospettati di sviluppare queste armi a dispetto dei trattati. Nel 1980 solo l'Unione Sovietica era stata accusata dagli Stati Uniti di avere violato la Convenzione del 1972 sulle armi biologiche, un trattato che proibisce lo sviluppo e il possesso di armi biologiche. Da allora, il numero è lievitato. Nel 1989 il direttore della CIA, William Webster, ha riferito che «almeno 10 paesi» stavano sviluppando armi biologiche. Entro il 1995, 17 paesi erano stati additati come sospetti, secondo fonti citate dall'Office of Technology Assessment. Fra di essi vi sono Iran, Iraq, Libia, Siria, Corea del Nord, Taiwan, Israele, Egitto, Vietnam, Laos, Cuba, Bulgaria, India, Corea del Sud, Sudafrica, Cina e Russia. (I russi affermano di avere messo fine ai programmi biologici, ma gli esperti statunitensi mettono in dubbio queste dichiarazioni.)

I primi cinque di questi paesi suscitano particolari preoccupazioni per il loro atteggiamento tradizionalmente aggressivo. L'Iraq, per esempio, ha riconosciuto quanto era stato denunciato dagli ispettori delle Nazioni Unite: che cioè durante la guerra del Golfo fossero presenti nei suoi arsenali missili Scud armati con testate biologiche. Un rapporto del 1994 del Pentagono al Congresso sosteneva che l'instabilità in Europa orientale, nel Medio Oriente e nel Sud-est asiatico avrebbe potuto incoraggiare un numero ancora maggiore di nazioni a sviluppare armi biologiche e chimiche.

L'inversione di questa tendenza dovrebbe stare enormemente a cuore alla comunità internazionale. L'eliminazione degli arsenali biologici e chimici sarebbe un obiettivo importantissimo, per quanto assai difficile, e un fallimento potrebbe rendere meno remota la possibilità che qualcuno prima o poi dia inizio a un'epidemia di virus Ebola o di qualche altro terribile agente patogeno.

L'impegno al disarmo biologico in particolare dovrebbe essere incentivato da un'altra dura realtà: in molti scenari non vi è alcuna possibilità di difendere la popolazione da un attacco biologico. I vaccini possono prevenire alcune malattie ma, a meno che l'agente patogeno non sia noto in anticipo, tale mezzo di prevenzione sarebbe del tutto inapplicabile. Gli antibiotici hanno effetto contro batteri specifici o particolari classi di agenti patogeni, ma non contro tutti; inoltre in tutto il mondo si sta manifestando un aumento dell'incidenza di malattie infettive in seguito allo sviluppo di ceppi di batteri resistenti agli antibiotici e refrattari a ogni terapia. In questa era di biotecnologie si potrebbero produrre con l'ingegneria genetica organismi del tutto nuovi, contro cui vaccini e antibiotici non sarebbero di aiuto.

Neppure le barriere fisiche costituiscono un riparo contro le infezioni. Fortunatamente la maggior parte degli agenti biologici non è in grado di attraversare la pelle intatta: maschere antigas e indumenti adeguati basterebbero a garantire una protezione sufficiente a gran parte della popolazione fino a che i raggi solari e la temperatura ambiente non abbiano distrutto gli agenti patogeni. Ma certi microrganismi sono in grado di resistere a tempo indefinito nell'ambiente. Gruinard Island, al largo della costa scozzese, è rimasta contaminata con spore del carbonchio per oltre 40 anni dopo gli esperimenti di guerra biologica condotti in quella sede durante gli anni quaranta. E nel 1981 Rex Watson, allora capo del Chemical and Biological Defence Establishment britannico, dichiarò che se Berlino fosse stata bombardata con batteri del carbonchio nella seconda guerra mondiale, sarebbe rimasta contaminata fino ai nostri giorni.

Per quanto molti israeliani si siano abituati a un uso prolungato delle maschere antigas durante la guerra del Golfo del 1991, è irrealistico immaginare che un gran numero di civili possa indossare simili protezioni per mesi o forse anni, specialmente in regioni a clima caldo. Gli ispettori delle Nazioni Unite in Iraq riferiscono come in quel clima fosse per loro a malapena possibile tollerare la maschera per un quarto d'ora.

Dopo la guerra del Golfo si sono intensificate le pressioni per avviare programmi più efficaci di difesa biologica. Chi propone un aumento dei fondi nella ricerca per la difesa biologica spesso pare ritenere che i vaccini e gli indumenti protettivi sviluppati siano in grado di garantire protezione tanto ai civili quanto ai militari. Ma le stesse considerazioni valgono sia per le truppe sia per la popolazione civile: a meno che un organismo non sia conosciuto in anticipo e non sia vulnerabile alle terapie, la difesa può rivelarsi illusoria.

Di fatto, l'esperienza della guerra del Golfo è stata per alcuni aspetti fuorviante. Si dava per inteso che le armi biologiche in possesso degli iracheni fossero il bacillo del carbonchio e la tossina botulinica. (Anche se le tossine sono prodotti inanimati dei microrganismi, sono considerate agenti biologici ai termini della Convenzione del 1972 sulle armi biologiche.) Per entrambi questi agenti sono disponibili vaccini e terapie, e pertanto la protezione delle truppe sembrava comunque possibile.

Ma è importante considerare quanto sia improbabile riuscire a scongiurare attacchi condotti con agenti meno tradizionali. Pensare che si possano trovare difese contro attacchi effettuati con organismi di natura a priori ignota sembra del tutto fantasioso. Inoltre, pur con gli inevitabili limiti, il costo dell'approntamento di un sistema nazionale per la difesa della popolazione da attacchi chimici e biologici sarebbe ingentissimo. Un rapporto del 1969 delle Nazioni Unite indicava che la spesa per l'approvvigionamento di maschere antigas, antibiotici, vaccini e altre misure difensive per i civili avrebbe superato i 20 miliardi di dollari. Questa cifra ammonterebbe oggi a 80 miliardi di dollari.

Vaccini e indumenti protettivi non sono il solo problema da risolvere per l'approntamento di una difesa biologica. La rapida identificazione di un agente patogeno sul campo di battaglia è assai problematica, e perfino accertare se un attacco biologico sia stato lanciato o meno può essere difficoltoso. Pertanto il Pentagono concentra soprattutto la propria attenzione sul problema del rilevamento.

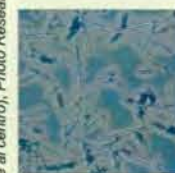
Nel maggio 1994 il vicesegretario alla Difesa John Deutch rese pubblico un rapporto di enti diversi sulle attività di controproliferazione riguardanti armi di sterminio. In particolare, egli scriveva, i mezzi di rilevamento di agenti biologici non erano studiati in modo adeguato; raccomandava dunque di aggiungere altri 75 milioni di dollari allo stanziamento annuale di 110 milioni di dollari per lo sviluppo di mezzi di rilevamento biologico. Già in corso erano programmi sponsorizzati dal Pentagono per lo sviluppo di tecnologie come la spettrometria di massa a intrappolamento ionico e la spettroscopia a decomposizione indotta da laser, metodi che mirano a identificare la presenza nell'aria di pericolosi agenti chimici. La speranza dei militari, che a quanto ammettono i portavoce è ben lontana dal realizzarsi, è quella di entrare in possesso di un rivelatore universale in grado di identificare classi di agenti patogeni.

Nel frattempo, i militari stanno puntando su un approccio più limitato che identifichi agenti specifici tramite combinazioni anticorpo-antigene. Il Biological Integrated Detection System (BIDS) espone campioni di aria sospetta ad anticorpi che reagiscono con un certo agente biologico. Una reazione anticorpale - che richiede circa 30 minuti - indicherebbe che quest'ultimo è presente.

I BIDS possono ora identificare quattro agenti attraverso reazioni anticorpo-antigene: *Bacillus anthracis* (il batterio che provoca il carbonchio), *Yersinia pestis* (che causa la peste), la tossina botulinica (liberata dal batterio *Clostridium botulinum*) e l'enterotossina stafilococcica B (prodotta da alcuni stafilococchi). Esami di laboratorio per l'identificazione di ulteriori agenti attraverso reazioni anticorpo-antigene stanno facendo progressi, ma rimane dubbio che i BIDS possano mai coprire l'intera gamma, o anche solo la maggioranza, degli agenti potenzialmente impiegabili a fini bellici.

La più efficace salvaguardia nei confronti della guerra biologica e del terrorismo biologico è e resterà la prevenzione. A questo fine è importante incrementare le capacità di controllo sulle transazioni commerciali riguardanti agenti patogeni. Al tempo stesso, si stanno compiendo tentativi per identificare e controllare le malattie emergenti, uno dei quali è Pro-MED (Program to Monitor Emerging Diseases), proposto nel 1993 dalla Federation of American Scientists.

Pur preoccupandosi di malattie emergenti in generale, i fautori di ProMED sono sensibili alla possibilità di epidemie indotte dall'uomo. Il sistema di sorveglianza ProMED dovrebbe comprendere la compilazione di basi di dati sulle malattie endemiche nelle varie parti del mondo, la rapida notificazione di epidemie anomale, e risposte mirate al contenimento della malattia, come l'emanazione di raccomandazioni per il commercio o il turismo. Tale programma dovrebbe consentire di distinguere epidemie provocate dall'uomo più efficacemente di quanto non sia oggi possibile.

Potenziali agenti biologici

Bacillus anthracis. Causa il carbonchio. Se i batteri sono inalati, i sintomi possono manifestarsi in due o tre giorni. I sintomi iniziali assomigliano a quelli di una comune affezione respiratoria e sono seguiti da febbre alta, vomito, dolore alle giunture, difficoltà di respirazione e lesioni sanguinanti interne ed esterne. L'esposizione a questo batterio può essere fatale. Vaccini e antibiotici danno una certa protezione, a meno che l'esposizione non sia molto alta.

Tossina botulinica. È la causa del botulismo e viene prodotta dal batterio *Clostridium botulinum*. I sintomi si manifestano da 12 a 72 ore dopo l'ingestione o l'inalazione. In un primo momento si hanno nausea e diarrea, seguite da debolezza, vertigini e paralisi respiratoria, che spesso conduce a morte la vittima. L'antitossina specifica può in qualche caso arrestare il decorso dell'infezione.

Yersinia pestis. È la causa della peste bubbonica, la temutissima «morte nera» del Medioevo. Se il batterio raggiunge i polmoni, i sintomi - tra cui febbre e delirio - possono manifestarsi nel giro di tre o quattro giorni. I casi non curati hanno quasi sempre esito mortale. Esistono vaccini che possono conferire immunità, e gli antibiotici sono di solito efficaci se somministrati prontamente e in modo adeguato.

Virus Ebola. Altamente contagioso e letale. Potrebbe essere scarsamente adatto come agente biologico a causa della sua instabilità al di fuori dell'ospite animale. I sintomi, che si manifestano due o tre giorni dopo l'esposizione, comprendono febbre alta, delirio, forte dolore alle giunture, sanguinamento dagli orifizi e convulsioni, seguite dal decesso. Non è disponibile alcuna terapia.

M. Walker, Photo Researchers (in alto); CNRI Science Photo Library/Photo Researchers (le due al centro); Photo Researchers (in basso)

Inoltre dovrebbero essere incoraggiati passi per il rafforzamento della Convenzione sulle armi biologiche del 1972 attraverso provvedimenti di verifica, come ispezioni *in situ*. I 139 paesi che aderiscono alla convenzione hanno discusso l'introduzione di misure di verifica in una Conferenza di aggiornamento tenutasi alla fine del 1996. Dopo l'ultima Conferenza di aggiornamento, del 1991, era stato istituito un comitato, VEREX, per lo studio di tali misure; esso aveva elencato varie possibilità che andavano dal controllo della letteratura scientifica alle ispezioni *in situ* di potenziali aree di produzione, come laboratori, birrerie e società farmaceutiche.

Data la facilità con cui si possono produrre armi biologiche, singoli individui saranno sempre in grado di aggirare gli accordi internazionali. Ma l'assenza di agenti biologici dagli arsenali nazionali - e il giro di vite nelle norme sull'acquisizione e il trasferimento di patogeni - renderanno più difficile anche per questi individui ottenere materiale per attuare i loro sinistri propositi. Le verifiche non saranno mai a prova di inganno, sicché alcuni critici affermano che gli sforzi in questo senso altro non siano che uno spreco di tempo. I fautori sostengono nondimeno che sanzioni applicate a una violazione documentata possano fungere almeno da disincentivo e che pertanto siano preferibili a una totale assenza di sanzioni. Inoltre, un trattato globale rafforzato rende viepplù solenne l'impegno da parte delle nazioni a non trafficare in queste armi.

Il fatto che le armi biologiche siano state usate fino a oggi in pochissimi casi potrebbe essere spiegato in modi diversi. Alcuni potenziali utenti hanno probabilmente una scarsa familiarità con le tecniche che permettono di sviluppare agenti patogeni come armi; inoltre potrebbero temere di autoinfettarsi. Stati e terroristi potrebbero anche essere ulteriormente scoraggiati dalla natura imprevedibile di questi agenti. Attraverso mutazioni, un batterio o un virus possono perdere o acquistare virulenza nel corso del tempo, e ciò potrebbe non coincidere con le intenzioni strategiche di chi ha fatto uso di questi agenti. Una volta introdotto nell'ambiente, un patogeno può costituire una minaccia per chiunque voglia accedere a quell'ambiente, rendendo pertanto difficile l'occupazione di un territorio.

Ma al di là di tutte queste considerazioni di ordine pragmatico si trova un'altra dimensione che richiede di essere sottolineata più di quanto in genere si faccia: la ripugnanza morale di queste armi. La loro capacità di causare grandi sofferenze, unita al loro carattere indiscriminato, contribuisce senza dubbio alla profonda avversione che istintivamente tutti avvertono nei loro confronti. Proprio questa avversione sembra fondamentale nello spiegare perché le armi biologiche siano state così raramente usate nel passato. Contrariamente alle analisi che di solito ignorano o sminuiscono il fenomeno, questa naturale ripugnanza dovrebbe essere apprezzata e anche sfruttata. Perfino alcuni terroristi potrebbero essere riluttanti a usare un'arma così spaventosa da suscitare un'avversione permanente dell'opinione pubblica nei confronti della loro causa.

Brian R. Wolff, IIPI

Potenziali agenti biologici e le relative misure di difesa vengono studiati in un laboratorio di massima sicurezza presso lo US Army Medical Research Institute of Infectious Diseases, nel Maryland.

Interpretando questo sentire comune, la Convenzione sulle armi biologiche del 1972 descrive le armi biologiche come «ripugnanti alla coscienza del genere umano». Tale modo di esprimersi ha radici che risalgono a migliaia di anni fa. (Non prima del XIX secolo si comprese che causa delle malattie erano i microrganismi; prima di allora, veleno e malattia erano visti come un'unica cosa.)

Tra i tabù etici di molte civiltà era compreso l'avvelenamento dei cibi e dei pozzi, nonché l'uso di armi avvelenate. Greci e romani condannavano l'uso del veleno in guerra come violazione dello *ius gentium*, la legge comune a tutte le nazioni. In India i veleni e altre armi considerate inumane erano proibiti dal *Codice delle leggi di Manu* già attorno al 500 a.C., e la stessa proibizione fu introdotta dai saraceni un millennio più tardi. Le proibizioni furono reiterate dal giurista olandese Ugo Grozio nella sua opera del 1625 *De iure belli ac pacis*, e furono, in gran parte, rispettate anche nelle guerre di religione europee di quel periodo.

Come i tabù dell'incesto, del cannibalismo e di altri atti universalmente aborriti, anche il tabù delle armi avvelenate è stato a volte violato. Ma la frequenza di tali violazioni potrebbe essere stata ridotta al minimo dalla loro riprovazione in quanto «venir meno ai sani principi», secondo le parole del giurista inglese del XVIII e XIX secolo Robert P. Ward. Sotto la legge delle nazioni, scriveva Ward, «nulla è più espressamente proibito dell'uso di armi *avvelenate*» (il corsivo è nell'originale).

Lo storico John Ellis van Courtland Moon, ora professore emerito al Fitchburg State College nel Massachusetts, sostiene che il nazionalismo montante nel XIX secolo abbia indebolito la disciplina sulle armi avvelenate. Come risultato di ciò che Moon chiama «nazionalizzazione dell'etica», le necessità militari iniziarono a far sì che fossero messe da parte le considerazioni di ordine morale nelle politiche degli Stati: le nazioni cominciarono a prendere in considerazione ogni mezzo possibile per il raggiungimento dei loro scopi bellici.

Alla metà del XIX secolo, alcuni capi militari proposero che fossero impiegate armi tossiche, anche se ciò in effetti non accadde. Nondimeno, i gas furono usati nella prima guerra mondiale. L'impiego su larga scala di armi chimiche suscitò un tale orrore da condurre al Protocollo di Ginevra del 1925, che proibisce l'uso bellico di agenti chimici e batteriologici. Le immagini di vittime rantolanti e con la schiuma alla bocca avevano avuto un impatto profondo. Il testo del protocollo sottolineava come queste armi fossero state «giustamente condannate dall'opinione generale del mondo civile».

Le armi chimiche e biologiche non sono state usate in quasi alcuna delle centinaia di guerre o schermaglie dei decenni successivi, fino ai massicci attacchi chimici da parte dell'Iraq durante la guerra Iran-Iraq. Purtroppo la risposta internazionale al comportamento degli iracheni fu debole o inefficace. Dal 1983 fino al termine della guerra, nel 1988, all'Iraq fu consentito di continuare a usare armi chimiche. Il timore di una vittoria iraniana smorzò i clamori contro un tipo di arma che era stato universalmente condannato.

Le conseguenze del silenzio sul comportamento dell'Iraq non sorprendono. Il fatto che a questo paese fosse stato implicitamente concesso di usare con impunità armi chimiche e l'evidente efficacia di queste armi fecero sì che diversi Stati iniziassero ad armarsi con agenti chimici e biologici. Per ironia della sorte, nel 1991 molti paesi che erano rimasti in silenzio sugli attacchi chimici iracheni si trovarono ad affrontare sul campo di battaglia un Iraq chimicamente e biologicamente attrezzato.

Dopo la guerra del Golfo, gran parte della comunità internazionale ha messo sotto pressione l'Iraq sulla questione delle sue armi non convenzionali attraverso le sanzioni decretate dal Consiglio di sicurezza delle Nazioni Unite. Le risoluzioni del Consiglio richiedono l'eliminazione delle armi biologiche irachene (e di altre armi di distruzione di massa), e impongono anche di fornire tutte le informazioni sui programmi condotti in passato per il loro sviluppo. L'Iraq è stato finora solo in parte disponibile, e gli ispettori delle Nazioni Unite continuano ad attendere una piena apertura.

Ma anche ora, i rapporti delle Nazioni Unite suonano di solito molto formali: i toni sdegnati sono rari. Ogni paese o gruppo che sviluppi queste armi dovrebbe essere investito da una condanna veemente. Le sole parole, ovviamente, non bastano. Importanti sono le informazioni e i controlli sui traffici nazionali e internazionali di patogeni e una più accurata sorveglianza su episodi epidemici.

La più alta priorità del momento a questo riguardo è l'attuazione della Convenzione sulle armi chimiche, che mette fuorilegge il possesso di questi mezzi di offesa. Essa elenca le sostanze chimiche che le nazioni firmatarie devono dichiarare di avere in proprio possesso. A differenza della Convenzione sulle armi biologiche, il trattato sulle armi chimiche ha molti strumenti di attuazione, come le ispezioni con breve preavviso nei casi di sospette violazioni. Esso prevede inoltre incentivi, come privilegi commerciali tra i firmatari.

Nel 1993 il trattato sulle armi chimiche è stato aperto alla firma. Nell'ottobre 1996 era stato sottoscritto da 160 paesi e ratificato da 64, uno meno del numero richiesto perché l'accordo entri in vigore. Una delle firme mancanti era purtroppo quella del rappresentante degli Stati Uniti. In parte a causa di disaccordi sulle clausole di verifica del trattato, il Senato statunitense ha recentemente rimandato una votazione in merito.

L'adempimento di questo trattato sulle armi chimiche dovrebbe dare impulso agli attuali negoziati per il rafforzamento della Convenzione sulle armi biologiche. Viceversa, un fallimento della Convenzione sulle armi chimiche allontanerebbe le prospettive di un regime di verifica per il trattato su quelle biologiche. La conseguenza più prevedibile sarebbe una continua proliferazione di arsenali chimici e biologici in tutto il mondo. Più a lungo queste armi verranno mantenute, più il senso della loro illegittimità tenderà a venir meno, e più facilmente esse potranno essere impiegate da eserciti e gruppi terroristici.

Come osservano gli analisti, i gruppi subnazionali usano di solito i tipi di armi che si trovano negli arsenali nazionali. L'assenza di armi biologiche e chimiche dagli arsenali militari nazionali potrebbe fare diminuire la loro attrattiva per i terroristi. Secondo l'esperto di terrorismo Brian M. Jenkins, i capi della setta Aum Shinrikyo hanno lasciato intendere che il loro interesse per le armi chimiche fosse stato suscitato dall'impiego di queste armi da parte degli iracheni nella guerra contro l'Iran.

I trattati, i regimi di verifica, la sorveglianza globale, il controllo sui traffici di patogeni sono i soli mezzi a disposizione contro le armi biologiche e chimiche. L'efficacia di questi strumenti dipende in definitiva dal supporto di una comune coscienza morale. Solo rafforzando un senso morale risolutamente avverso alle armi biologiche sarà possibile pervenire alla loro proibizione.

Le difese contro le armi biologiche

Maschera antigas. I filtri, di solito in carbone attivo, devono essere in grado di bloccare particelle più grandi di un micrometro. Sono anche consigliabili indumenti speciali per evitare il contatto degli agenti patogeni con lesioni della cute.

Riparo protettivo. Meglio se una stanza chiusa, nel caso ideale isolata con qualche materiale non permeabile e ventilata con aria filtrata.

Decontaminazione. Disinfettanti tradizionali come la formaldeide sono efficaci per la sterilizzazione di superfici.

Vaccinazione. Deve essere specifica. Per acquisire l'immunità nei confronti di alcuni agenti sono necessarie diverse inoculazioni dilazionate lungo un certo periodo di tempo.

Antibiotici. Efficaci contro alcuni agenti batterici (ma non tutti, e comunque non contro i virus). Per alcuni batteri sensibili, la terapia antibiotica deve iniziare entro poche ore dall'esposizione, prima della manifestazione dei sintomi.

Sistemi di identificazione. Attualmente sono disponibili solo *kit* da campo relativamente rudimentali per pochi agenti specifici. Sono in corso ricerche per ampliare il numero di agenti rilevabili sul campo di battaglia o in situazioni di emergenza.

LEONARD A. COLE, laureatosi in scienze politiche alla Columbia University nel 1970, è attualmente professore associato di scienze politiche alla Rutgers University di Newark, nel New Jersey. È un esperto nell'ambito interdisciplinare che considera il rapporto tra scienza e politiche di pubblico impatto, con una particolare specializzazione nelle politiche riguardanti la guerra biologica e chimica, il radon e varie questioni sanitarie.

COLE LEONARD A., *Clouds of Secrecy: The Army's Germ Warfare Tests over Populated Areas*, Rowman and Littlefield, 1990.

ROBERTS BRAD (a cura), *Biological Weapons: Weapons of the Future?*, Center for Strategic and International Studies, 1993.

DANDO MALCOLM, *Biological Warfare in the 21st Century*, Macmillan, 1994.

COLE LEONARD A., *The Eleventh Plague: The Politics of Biological and Chemical Warfare*, W. H. Freeman and Company, 1996.

L'idrogeno primordiale e il big bang

L'abbondanza dei nuclei di deuterio, formatisi nei primi istanti dopo il big bang, permette di far luce sull'evoluzione dell'universo primordiale e sulla composizione della materia oscura

di Craig J. Hogan

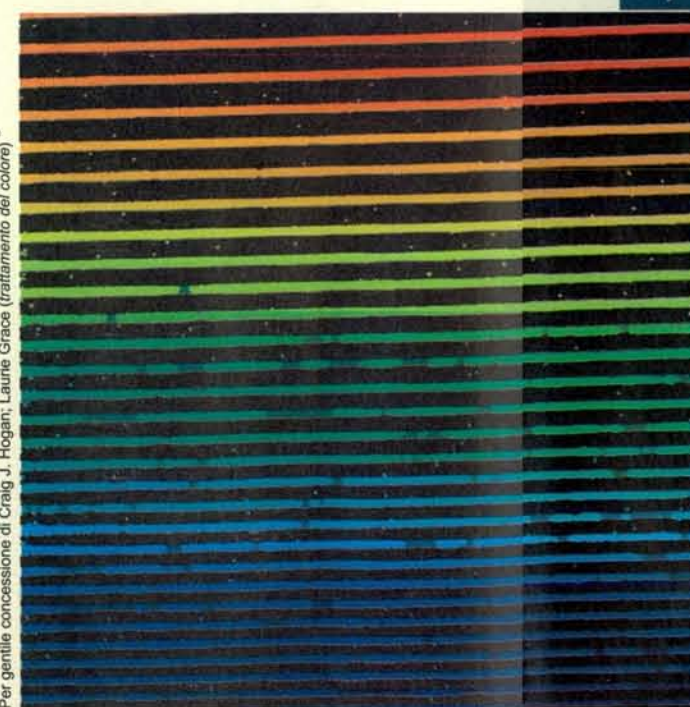
Il modello del big bang descrive l'universo primordiale come un'entità straordinariamente semplice, priva di qualsivoglia struttura a scala più grande delle singole particelle elementari. Anche se il comportamento previsto dalla teoria è regolato solo dalla relatività generale, dal modello standard della fisica delle particelle e dalle modalità di distribuzione di energia previste dalla termodinamica di base, essa sembra descrivere in maniera del tutto adeguata la «palla di fuoco» primordiale.

I nuclei atomici formatisi durante i primi istanti di vita dell'universo forniscono preziosi indizi per chiarire sia lo svolgersi degli eventi iniziali sia la composizione e la struttura del cosmo attuale. Il big bang generò un universo composto quasi interamente di idrogeno ed elio. Il deuterio venne sintetizzato solo nei primi istanti dell'universo; esso rappresenta quindi un marcatore particolarmente importante. Il rapporto fra atomi di deuterio e atomi di idrogeno dipende fortemente sia dall'uniformità sia dalla quantità totale della materia formatasi nel big bang. In anni recenti gli astronomi hanno potuto effettuare per la prima volta misurazioni affidabili e dirette del deuterio in antiche nubi di gas; i risultati potrebbero fornire un metodo preciso per verificare la cosmologia del big bang.

L'espansione dell'universo sembra essere iniziata fra 10 e 20 miliardi di anni fa. Quando il cosmo aveva un'età di solo un secondo, la sua temperatura era di oltre 10 miliardi di kelvin, 1000 volte superiore a quella del nucleo del Sole. A questa temperatura, le distinzioni fra tipi diversi di materia ed energia non erano definite come oggi: le particelle subatomiche come neutroni e protoni si trasmutavano continuamente le une nelle altre, eccitate da interazioni con gli abbondantissimi elettroni, positroni e neutrini di alta energia. I neutroni sono però leggermente più pesanti dei protoni; al procedere del raffreddamento, gran parte della materia si assestò nella forma più stabile di protoni. Come conseguenza, quando la temperatura scese al di sotto di 10 miliardi di kelvin e la trasmutazione cessò, i protoni erano in numero circa sette volte maggiore dei neutroni.

Quando l'universo aveva un'età di alcuni minuti (e una temperatura di circa un miliardo di kelvin), protoni e neutroni iniziarono a unirsi per formare nuclei. Ciascun neutrone trovò un partner protonico, dando origine a una coppia chiamata deuterone, e a loro volta quasi tutti i deuteroni si accoppiarono in nuclei di elio, i quali contengono due protoni e due neutroni. All'epoca in cui si formò l'elio primordiale, la densità dell'universo era ormai troppo bassa per consentire a ulteriori reazioni di fusione di sintetizzare elementi più pesanti nel tempo disponibile; di conseguenza, quasi tutti i neutroni furono incorporati in nuclei di elio.

Senza neutroni che li tengano uniti, i protoni non possono legarsi in nuclei a causa della repulsione elettrostatica. Dato che la quantità di neutroni generata nella palla di fuoco primordiale era limitata, sei protoni su sette avrebbero dovuto rimanere in forma di nuclei di idrogeno isolati. Come conseguenza, il modello del big bang prevede che circa un quarto della massa della materia normale dell'universo sia costituito da elio e gli altri tre quarti da idrogeno. Questa semplice previsione è in ottimo accordo con le osservazioni. Poiché l'idrogeno è il combustibile principale delle stelle, la sua prevalenza nell'universo permette l'esistenza del Sole e degli astri.

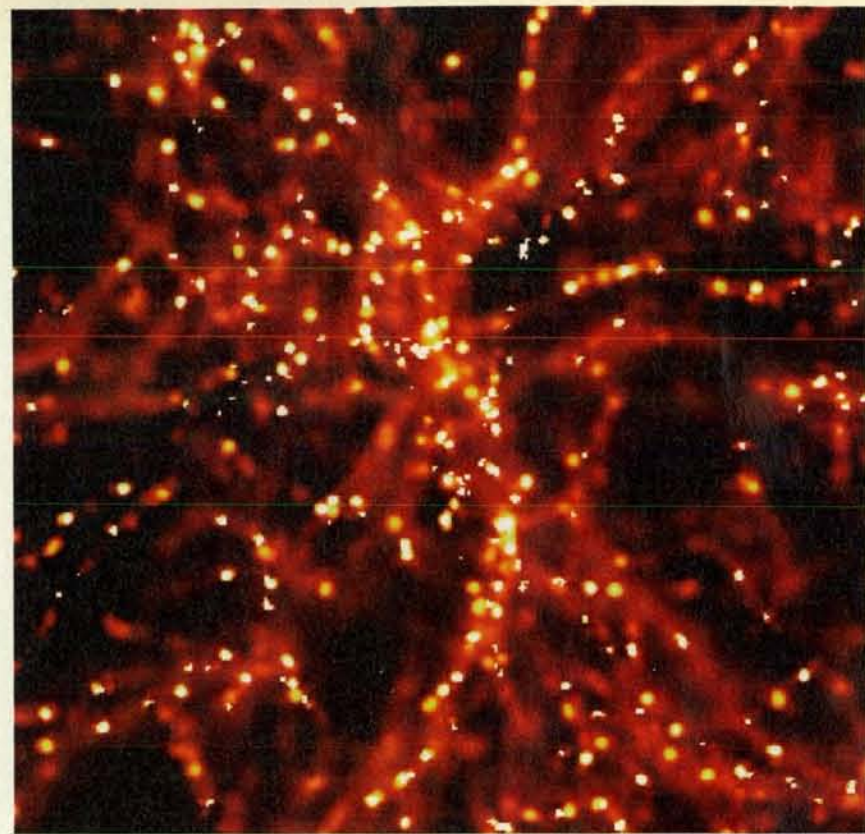
Durante la formazione dei nuclei di elio, forse solo un deuterone su 10 000 rimase non accoppiato. Una frazione ancora minore si fuse dando origine a nuclei più pesanti dell'elio, come il litio. (Gli altri elementi del sistema periodico vennero sintetizzati molto più tardi, all'interno delle stelle.) Le percentuali

Per gentile concessione di Craig J. Hogan; Laurie Grace (trattamento del colore)

Roger Ressmeyer Corbis

Presso il telescopio Keck sul Mauna Kea (Hawaii), la luce di un quasar lontano è stata raccolta e concentrata sul fotorivelatore di uno spettroscopio ad alta risoluzione. Le fasce colorate risultanti sono interrotte da righe nere laddove gas interposto fra il quasar e la Terra ha assorbito radiazione di specifiche lunghezze d'onda. L'analisi delle righe di assorbimento dell'idrogeno può rivelare la presenza di deuterio.

esatte di elio, deuterio e litio dipendono da un solo parametro: il rapporto fra barioni - un termine che include sia protoni sia neutroni - e fotoni. Il valore di questo rapporto, chiamato η, essenzialmente non varia con l'espansione dell'universo; dato che si può misurare il numero di fotoni, la conoscenza di η ci dice quanta materia esiste. Questo valore è importante per comprendere l'evoluzione successiva dell'universo, perché può essere confrontato con la quantità effettiva di materia osservabile nelle stelle e di gas nelle galassie, nonché con l'enorme quantità di materia oscura invisibile.

Perché nel big bang venissero prodotte le percentuali osservate di elementi leggeri, η doveva essere molto piccolo. L'universo conterrebbe meno di un barione per ogni miliardo di fotoni. La temperatura della radiazione cosmica di fondo ci informa direttamente sul numero di fotoni residui del big bang: attualmente vi sono circa 411 fotoni per centimetro cubo. Pertanto i barioni dovrebbero avere una densità un poco inferiore a 0,4 per metro cubo. Sebbene i cosmologi sappiano che η è piccolo, le stime del suo valore esatto attualmente differiscono quasi di un fattore 10. Gli indicatori più precisi e affidabili di η sono le concentrazioni degli elementi leggeri primordiali, e in particolare del deuterio. Un aumento di cinque volte di η, per esempio, comporterebbe un decremento di ben 13 volte nella quantità di deuterio sintetizzato.

L'esistenza del deuterio pone un limite superiore a η, perché il big bang è stato probabilmente la fonte primaria di questo isotopo, che in seguito è stato gradualmente distrutto dai processi che avvengono nelle stelle. La nucleosintesi nel big bang è durata solo pochi minuti, ma le reazioni di fusione nelle stelle proseguono per milioni o miliardi di anni; di conseguenza il deuterio presente in esse viene convertito in elio o in elementi più pesanti. Tutto il deuterio che si osserva oggi deve quindi essersi formato nel corso del big bang.

Per gentile concessione di Craig G. Hogan (riquadro)/Alfred T. Kamajian

Determinare la composizione dell'universo primordiale è complicato, perché da allora una quantità enorme di materia si è trasformata all'interno delle stelle. Tuttavia la radiazione di quasar lontani miliardi di anni luce offre una soluzione a questo problema. Nei primi istanti di vita dell'universo questa radiazione attraversò nubi di gas non ancora rielaborato, forse ai margini di una galassia in formazione (un modello al calcolatore di una nube di gas primordiale è mostrato a sinistra). L'idrogeno e il deuterio contenuti in queste nubi assorbono lunghezze d'onda tipiche della radiazione emessa dai quasar; i cambiamenti risultanti possono essere rilevati e misurati da terra.

TEMPO ATTUALE

9 MILIARDI DI ANNI FA (CIRCA)

9,5 MILIARDI DI ANNI FA (CIRCA)

La determinazione del rapporto fra deuterio e idrogeno primordiali potrebbe fornirci informazioni utili, ma è irta di ostacoli, il primo dei quali è la complessità dell'universo attuale. Gli astronomi possono misurare il deuterio nelle nubi interstellari di idrogeno atomico della nostra galassia, ma la «fragilità» di questo isotopo spinge a diffidare dei risultati.

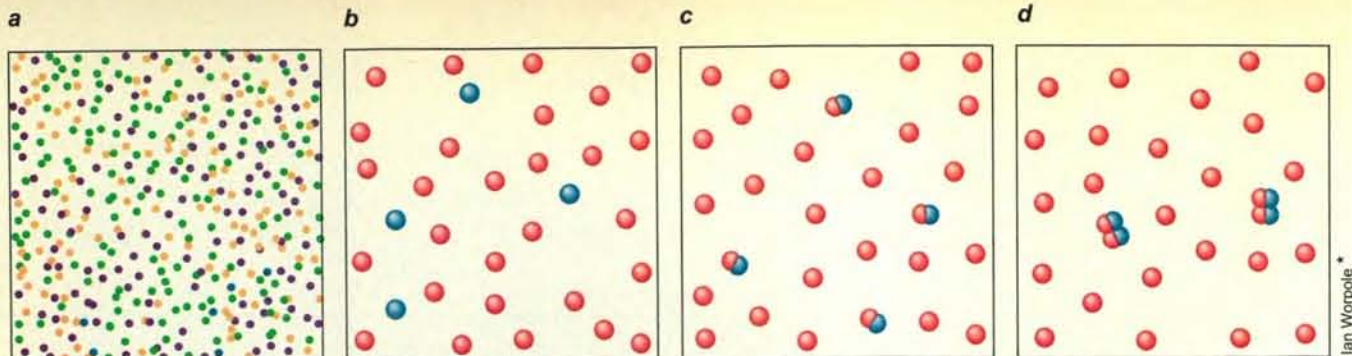
La Via Lattea è una galassia di mezza età il cui gas è stato elaborato radicalmente più volte nel corso dei 10 miliardi di anni della storia galattica. La combustione del deuterio avviene molto facilmente, anche nell'involucro delle stelle e nel corso delle prime fasi di evoluzione prestellare. Le stelle espellono gli strati più esterni nello spazio al termine del loro ciclo di vita, e il gas oggi presente nella nostra galassia è stato più volte incorporato in stelle e quindi espulso. Di conseguenza, l'osservazione delle nubi di gas vicine può indicare solo un limite inferiore per l'abbondanza del deuterio primordiale.

L'ideale sarebbe poter disporre di materia primordiale intatta, mai sottoposta a evoluzione chimica. Anche se, ovviamente, non è possibile studiare questa materia in laboratorio, possiamo stabilirne la composizione osservando il suo effetto sullo spettro della luce proveniente da sorgenti lontane. I quasar - gli oggetti più luminosi del cosmo - sono così lontani che la luce che vediamo oggi venne emessa quando l'universo aveva meno di un quarto della dimensione attuale e forse un decimo dell'età. Lungo il cammino che percorre fino a noi, la luce dei quasar attraversa nubi di gas che non si sono ancora condensate in galassie, e la radiazione che queste assorbono fornisce indicazioni sulla loro composizione. Alcune delle nubi individuate in questo modo contengono meno di un millesimo della quantità di carbonio e silicio (entrambi prodotti della fusione stellare) presente nello spazio circostante: una buona indicazione del fatto che esse mantengono una composizione molto vicina a quella che avevano immediatamente dopo il big bang.

Vi è un altro vantaggio legato all'osservazione di oggetti così lontani. Il componente principale di queste nubi, l'idrogeno atomico, rivela la propria presenza con un gruppo di righe di assorbimento ben definite nella regione ultravioletta dello spettro, la cosiddetta serie di Lyman. Ciascuna di queste righe corrisponde alla lunghezza d'onda di un fotone che ha esattamente l'energia necessaria per eccitare l'elettrone di un atomo di idrogeno portandolo in un livello energetico eccitato. Dato che la serie di Lyman si trova nell'ultravioletto lontano, le righe non sono osservabili da terra a causa dell'assorbimento atmosferico; persino la riga più rossa (che è anche la più evidente), la Lyman alfa, appare alla lunghezza d'onda di 121,5 nanometri. Fortunatamente l'espansione dell'universo causa uno spostamento cosmologico verso il rosso (*redshift*) che incrementa la lunghezza d'onda apparente dei fotoni che giungono a terra fino al punto in cui le righe di assorbimento dell'idrogeno presente in nubi sufficientemente lontane vengono a cadere nella regione visibile dello spettro.

La riga Lyman alfa compare centinaia di volte nella luce di un tipico quasar; ogni «copia» è prodotta da una nube diversa posta sulla linea di vista, a redshift differenti e quindi a differenti lunghezze d'onda. Lo spettro che ne risulta può essere visto come una fetta stratificata di storia del cosmo, qualcosa di analogo agli anelli di accrescimento degli alberi o alle carote di ghiaccio della Groenlandia; negli spettri di assorbimento dei quasar è scritta la storia della trasformazione cha ha condotto dal gas uniforme prodotto nel big bang fino alle galassie che oggi vediamo disperse in un volume enorme di spazio. Questa molteplicità spettrale offre un altro modo per verificare il carattere primordiale della materia assorbente: il modello del big bang prevede che tutte le nubi di gas dell'universo primitivo debbano avere più o meno la stessa composizione. Misurando l'abbondanza dei vari elementi in nubi lontane, separate l'una dall'altra da vaste distanze sia nello spazio sia nel tempo, dovremmo riuscire a mettere direttamente alla prova l'ipotesi dell'uniformità cosmica.

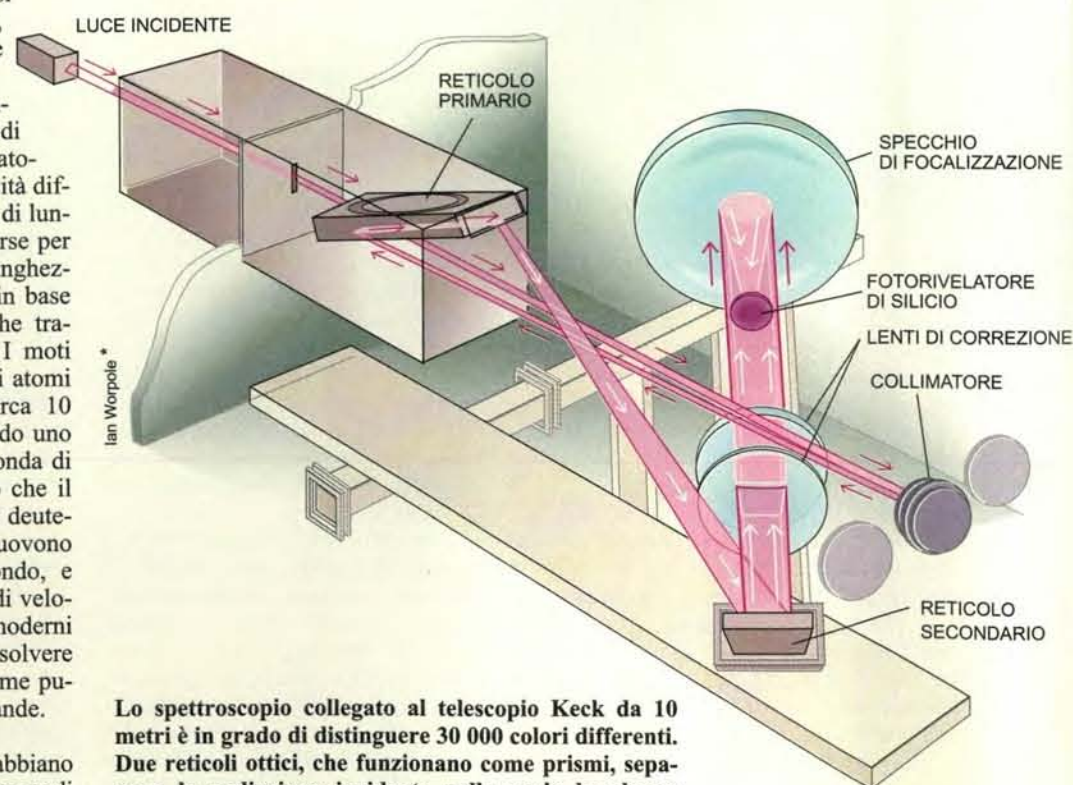
Per alcune di queste nubi possiamo determinare, dallo spettro dei quasar, sia la quantità di idrogeno sia quella di deuterio. Il segnale del deuterio può es-

a b c d

La nucleosintesi ebbe inizio quasi subito dopo il big bang, allorché, via via che l'universo primordiale si raffreddava, i quark liberi (*a*) si condensarono in protoni e neutroni (*b*). I protoni (*in rosso*) e i neutroni (*in blu*) formarono coppie chiamate deuteroni ma, dato che i primi erano assai più numerosi dei secondi, la maggior parte dei protoni rimase non accoppiata, dando origine a nuclei di idrogeno (*c*). Quasi tutti i deuteroni si combinarono a loro volta in nuclei di elio (*d*); oggi quindi non ne rimane che una minuscola frazione della quantità iniziale.

sere differenziato perché la massa più grande del nucleo di questo isotopo aumenta l'energia richiesta per le transizioni atomiche di circa una parte su 4000 (ossia due volte il rapporto fra la massa del protone e quella dell'elettrone). Di conseguenza, lo spettro di assorbimento del deuterio è simile a quello dell'idrogeno, ma tutte le righe presentano uno spostamento verso il blu equivalente a quello che sarebbe prodotto da un moto di 82 chilometri al secondo in direzione dell'osservatore. Nelle misurazioni spettrografiche delle nubi di idrogeno il deuterio si manifesta come una lieve «eco», spostata verso il blu, del segnale dell'idrogeno.

Questi spettri permettono anche di risalire alla distribuzione di velocità e di temperatura degli atomi. Quando si propagano a velocità differenti, gli atomi assorbono luce di lunghezze d'onda leggermente diverse per l'effetto Doppler, che altera la lunghezza d'onda apparente della luce in base al moto relativo dell'oggetto che trasmette e di quello che riceve. I moti termici casuali impartiscono agli atomi di idrogeno una velocità di circa 10 chilometri al secondo, provocando uno spostamento della lunghezza d'onda di circa una parte su 30 000; dato che il loro peso è doppio, gli atomi di deuterio alla stessa temperatura si muovono a soli sette chilometri al secondo, e quindi hanno una distribuzione di velocità leggermente differente. I moderni spettrografi sono in grado di risolvere queste differenze di velocità, come pure i moti collettivi a scala più grande.

Sebbene gli strumenti non abbiano difficoltà a risolvere le differenze di lunghezza d'onda fra idrogeno e deuterio, se si separa la luce proveniente da un quasar lontano in 30 000 lunghezze d'onda, l'intensità di ognuna diventa troppo bassa. Per oltre 20 anni, queste osservazioni sono state al limite dell'impossibile. Molti astronomi hanno trascorso notti ad attendere che i fotoni raggiungessero uno per volta i rivelatori dei più grandi telescopi del mondo, per scoprire che le condizioni atmosferiche, problemi legati agli strumenti o semplici limiti di tempo avevano impedito di raccogliere abbastanza luce da ottenere un risultato convincente. Questa tecnica è oggi divenuta più pratica solo grazie alla disponibilità di rivelatori più efficienti, del telescopio Keck da 10 metri, situato nelle Hawaii, e di spettrografi ad alta risoluzione e ad alta velocità come HIRES, montato sul Keck.

Dopo molti tentativi infruttuosi condotti su telescopi più piccoli, Antoinette Songaila e Lennox L. Cowie dell'Università di Hawaii ottennero finalmente, nel novembre 1993, di dedicare a questo progetto una notte di osservazioni con il Keck. Essi puntarono lo strumento su 0014 + 813, un quasar celebre fra gli astronomi per la sua luminosità; per alcuni anni esso aveva detenuto il primato

Lo spettroscopio collegato al telescopio Keck da 10 metri è in grado di distinguere 30 000 colori differenti. Due reticoli ottici, che funzionano come prismi, separano la radiazione incidente nelle varie lunghezze d'onda. Ulteriori componenti focalizzano il fascio su un wafer di silicio di alcuni centimetri di lato, il quale produce un'immagine come quella di pagina 46. Il wafer contiene quattro milioni di minuscoli fotorivelatori, ognuno di soli 20 micrometri di lato.

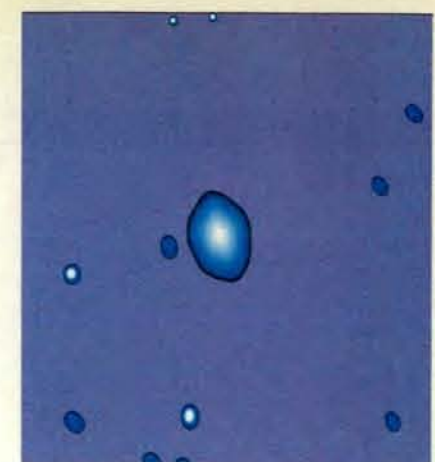
di oggetto più brillante dell'universo. Da studi precedenti, eseguiti da Ray J. Weymann degli Osservatori della Carnegie Institution di Washington e da Frederic Chaffee, Craig B. Foltz e Jill Bechtold dell'Università dell'Arizona con i loro collaboratori, sapevamo che di fronte a questo quasar si trova una nube di gas assai poco evoluta.

Il primo spettro, ottenuto in poche ore, era già di qualità sufficientemente alta da mostrare indizi credibili della presenza di deuterio. Lo spettro evidenziava righe di assorbimento di atomi di idrogeno in moto a velocità diverse e mostrava un'eco quasi perfetta della riga Lyman alfa, con il caratteristico spostamento verso il blu del deuterio. L'entità dell'assorbimento riscontrabile in questo secondo segnale è pari a quella che sarebbe prodotta da circa due atomi di deuterio su 10 000 di idrogeno. Il risultato è stato in seguito confermato indipendentemente da Robert F. Carswell dell'Università di Cambridge e colleghi, che hanno utilizzato dati ottenuti con il telescopio Mayall da quattro metri del Kitt Peak National Observatory in Arizona. Una successiva analisi ha rivelato che le righe di assorbimento del deuterio effettivamente mostrano una dispersione di velocità dovuta a moti termici insolitamente ristretta, come previsto.

Una parte dello spettro di assorbimento osservato potrebbe essere dovuta all'interposizione casuale di una piccola nube di idrogeno che si allontana da noi a una velocità di 82 chilometri al secondo inferiore rispetto a quella della nube principale; in questo caso, l'abbondanza reale del deuterio sarebbe inferiore a quanto pensiamo. Sebbene, a priori, la probabilità di una simile coincidenza appaia davvero piccola, dobbiamo considerare preliminare la stima ottenuta. Tuttavia l'efficacia della nostra tecnica è chiara. Grazie a essa si può studiare l'assorbimento di nubi poste di fronte a molti altri quasar e realizzare in poco tempo una campionatura statistica del deuterio nella materia primordiale. Il nostro gruppo e altri hanno già pubblicato misurazioni e limiti relativi a otto nubi differenti.

Uno dei risultati più interessanti è stato fornito da una misurazione compiuta da David Tytler e Scott Burles dell'Università della California a San Diego e da Xiao-Ming Fan della Columbia University, che hanno ottenuto un rapporto fra deuterio e idrogeno più basso quasi di un fattore 10 rispetto alla nostra stima. Resta da vedere se il loro risultato rappresenta il vero valore primordiale; una abbondanza così bassa potrebbe essere il risultato della combustione di deuterio in stelle primordiali o un'indicazione del fatto che la sintesi di questo isotopo potrebbe non essere stata uniforme come prevede il modello del big bang.

Se invece il nostro valore più elevato fosse quello corretto, la quantità di deuterio primordiale si accorderebbe molto bene con le previsioni standard del modello del big bang per un valore di η di circa due barioni ogni 10 miliardi di fotoni. Per questo valore di η, le previsioni del modello sono anche in accordo con la quantità di litio osservata nelle stelle più vecchie e con le stime dell'elio primordiale ricavate dall'osservazione di galassie vicine povere di elementi metallici. La conferma di questo risultato sarebbe un evento straordinario, in quanto dimostrerebbe che i cosmologi hanno interpretato esattamente quanto accadde solo un secondo dopo l'inizio dell'espansione dell'universo. Inoltre indicherebbe che la storia della materia lontana è simile a quella della materia nella nostra regione di spazio, come è postulato dal più semplice fra i modelli dell'universo.

Questa stima di η concorda ragionevolmente bene con il numero di barioni che oggi si osservano effettivamente nell'universo. La densità osservata di fotoni implica che vi sia all'incirca un atomo per 10 metri cubi di spazio. È circa lo stesso valore che si ottiene considerando tutta la materia contenuta nel gas, nelle stelle, nei pianeti e nella polvere cosmica, compresi i quasar stessi; pertanto, non esiste un grande «deposito» di barioni invisibili. Nello stesso tempo, le osservazioni fanno pensare che sia necessaria un'enorme quantità di materia oscura per spiegare il comportamento gravitazionale delle galassie e dei loro aloni; sembra che la densità di questa materia debba essere almeno 10 volte superiore alla densità media dei barioni visibili. Così, l'alta abbondanza di deuterio che abbiamo rilevato indica che questa massa non è costituita da materia atomica ordinaria.

Il quasar 0014 + 813 (qui mostrato alle lunghezze d'onda radio) è uno degli oggetti più luminosi che si conoscano. La radiazione emessa da questo corpo celeste, che si presume sia costituito da un buco nero supermassiccio al centro di una galassia molto giovane situata ai margini dell'universo osservabile, ha permesso di misurare per la prima volta il deuterio primordiale.

Per gentile concessione dell'US Naval Observatory; Ian Worpole (*trattamento del colore*)

Sono stati proposti molti candidati per queste forme non barioniche di materia oscura. Per esempio, il modello del big bang prevede che nell'universo debba esistere una quantità di neutrini circa uguale a quella di fotoni. Se ognuno di essi avesse una massa anche solo di qualche elettronvolt (ossia pari ad alcuni miliardesimi di quella del protone), i neutrini costituirebbero una quantità di materia paragonabile a quella di tutti i barioni. È anche possibile che nell'universo primordiale sia stato generato qualche tipo di particella che non siamo mai riusciti a produrre in laboratorio. In ogni caso, il modello del big bang, solidamente basato sulle osservazioni, fornisce un quadro di riferimento adeguato per prevedere le conseguenze astrofisiche di queste nuove teorie.

CRAIG J. HOGAN è preside del Dipartimento di astronomia e professore presso i Dipartimenti di fisica e di astronomia dell'Università di Washington. I suoi studi si concentrano sulle regioni più lontane dell'universo visibile.

WEINBERG STEVEN, *I primi tre minuti*, Mondadori, 1977.

SHU F. H., *The Physical Universe: An Introduction to Astronomy*, University Science Books, Mill Valley, California, 1982.

SILK J., *A Short History of the Universe*, W. H. Freeman and Company, 1994.

SONGAILA A., COWIE L. L., HOGAN C. J. et al., *Deuterium Abundance and Background Radiation Temperature in High-Redshift Primordial Clouds* in «Nature», 368, 14 aprile 1994.

HOLT S. S. e SONNEBORN G. (a cura), *Cosmic Abundances*, ASP Conference Series, 99, Astronomical Society of the Pacific, 1996.

FUKUGITA M., HOGAN C. J. e PEEBLES P. J. E., *The History of the Galaxies* in «Nature», 381, 6 giugno 1996.

L'asimmetria del cervello nei vertebrati

L'asimmetria di funzioni del sistema nervoso, associata nella nostra specie al linguaggio e alla dominanza manuale, è presente anche negli altri animali e potrebbe avere una lunga storia evolutiva

di Giorgio Vallortigara e Angelo Bisazza

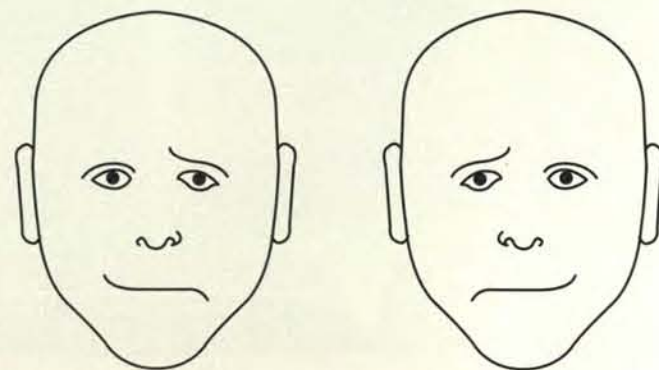
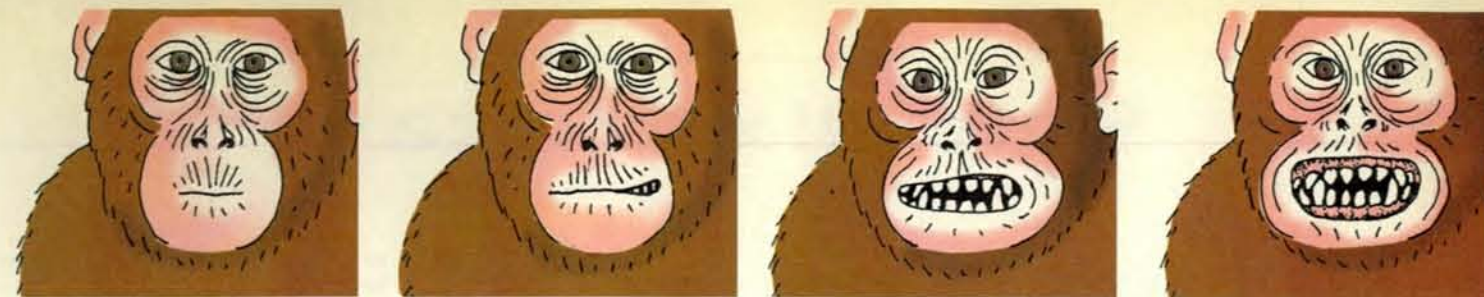
La simmetria bilaterale, con due metà del corpo che appaiono essere, almeno superficialmente, anatomicamente e funzionalmente identiche fa la sua comparsa a partire dal *phylum* dei platelminti, cui appartengono per esempio le planarie. Non esiste differenza sostanziale tra il rene o il polmone destro e quello sinistro di un mammifero o di un uccello. Questa simmetria sembra però non valere per il sistema nervoso, la cui organizzazione funzionale parrebbe essere unica: l'emisfero destro e l'emisfero sinistro del cervello umano svolgono funzioni differenti e appaiono essere anatomicamente differenti.

Nel 1836 il neurologo Marc Dax osservò che nei pazienti che soffrivano di disturbi del linguaggio a causa di una lesione cerebrale focale, la sede della lesione era nell'emisfero sinistro piuttosto che nel destro. Poco dopo, nel 1851, Paul Broca associò la paralisi del lato destro del corpo con la forma di afasia che ora porta il suo nome, e fu in grado di localizzare e circoscrivere l'area cerebrale danneggiata a una ristretta porzione dell'emisfero sinistro. (Si veda l'articolo *Specializzazioni del cervello umano* di Norman Geschwind in «Le Scienze» n. 135, novembre 1979.)

Nella gran parte dei membri della nostra specie, la produzione e la comprensione linguistica sono mediate da strutture nervose presenti unicamente nell'emisfero sinistro, quello che controlla la parte destra del corpo. L'emisfero destro, al contrario, controlla il lato sinistro del corpo e sembra implicato in processi quali l'espressione delle emozioni, il riconoscimento delle facce e l'analisi delle relazioni spaziali.

La divisione del lavoro tra i due emisferi cerebrali può manifestarsi in modi sorprendenti. Ad esempio, poiché ciascun emisfero controlla il lato opposto del corpo, ivi inclusi i muscoli facciali inferiori, le emozioni vengono espresse più intensamente sulla parte sinistra del volto, controllata dall'emisfero destro. Inoltre, tendiamo a prestare maggiore attenzione alle espressioni sul lato sinistro (elaborato principalmente dall'emisfero destro) delle facce che ci stanno di fronte. Quando invece usiamo il linguaggio parlato, sotto il controllo dell'emisfero sinistro, il lato destro della bocca si muove di più e prima del lato sinistro. Sempre nell'uomo, simmetrie anatomiche piuttosto grossolane sono visibili anche osservando il cervello a occhio nudo: l'emisfero sinistro tende a essere più largo nella regione posteriore, e il destro in quella anteriore. Queste asimmetrie hanno lasciato tracce sulla parte interna della calotta cranica, consentendo così di evidenziarne la presenza nei resti fossili dei primi ominidi.

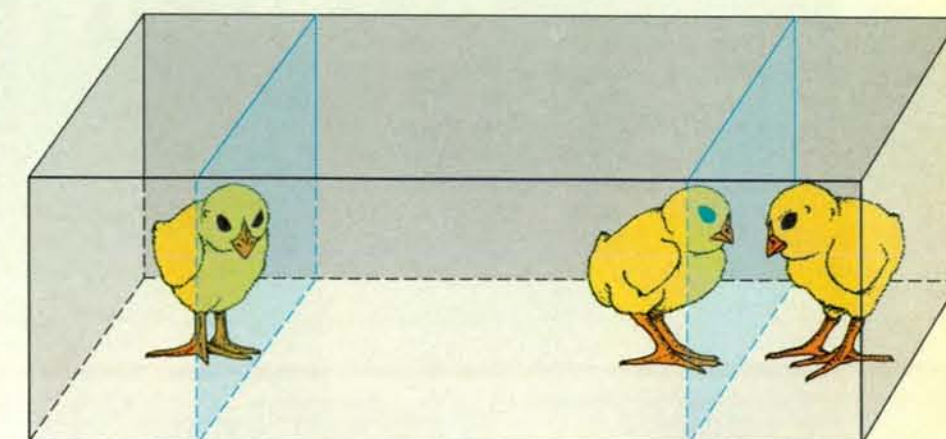
Per molto tempo si è ritenuto che la lateralizzazione cerebrale fosse una caratteristica della specie umana, associata all'uso del linguaggio e alla dominanza manuale. Questa concezione ha però dovuto essere profondamente modificata negli ultimi 15 anni, poiché è apparso chiaro che l'asimmetria cerebrale è presente in una grande varietà di specie animali.

Un esempio è stato fornito di recente da Marc Hauser dell'Università di Harvard, il quale ha esaminato fotogramma per fotogramma i filmati delle smorfie facciali di paura dei macachi reso, prodotte nei contesti sociali di sottomissione. Come mostra la figura nella pagina a fronte, la faccia delle scimmie si distorce in maniera fortemente asimmetrica e, proprio come accade negli esseri umani, il lato sinistro, controllato dall'emisfero destro, si muove prima ed è più «espressivo» del lato destro, controllato dall'emisfero sinistro.

Per evidenziare la dominanza dell'uno o dell'altro emisfero nelle risposte emotive ci si basa sul fatto che uno stimolo presentato nel semicampo visivo sinistro dà luogo a segnali nervosi che raggiungono direttamente l'emisfero destro, e viceversa. Lo psicologo Julian Jaynes, dell'Università di Princeton, ha fatto notare che guardando l'una o l'altra faccia - fissandone il centro - la gente vede prevalentemente un'espressione ridente nel primo caso (*a sinistra*) e mesta nel secondo. Ciò è dovuto al fatto che quando si osserva un volto con asimmetrie di espressione tra la parte destra e sinistra, l'impressione che se ne riceve è determinata dalla parte sinistra, cioè quella elaborata principalmente dall'emisfero destro.

Smorfia di paura di una scimmia reso al cospetto di un conspecifico dominante. La parte sinistra della faccia, controllata dall'emisfero destro, si muove ed esprime l'emozione prima della parte destra, controllata dall'emisfero sinistro. (I disegni sono tratti da una serie di fotogrammi che illustrano un lavoro di Marc Hauser pubblicato su «Science» del 23 luglio 1993.)

Anche l'associazione dell'emisfero sinistro con i meccanismi del linguaggio potrebbe non essere così unica. Günter Ehret dell'Università di Costanza ha scoperto che i richiami ultrasonici emessi dai piccoli di topo (che sono limitati a un ambito ristretto di frequenze) vengono riconosciuti dalla madre quando la stimolazione acustica è limitata all'orecchio destro, ma non quando lo è a quello sinistro. Poiché nel sistema uditivo le fibre crociate (che ciascun orecchio invia all'emisfero controlaterale) sono più numerose di quelle non crociate (che ascendono all'emisfero ipsilaterale), un vantaggio sistematico dell'orecchio destro riflette una superiorità dell'emisfero sinistro. Fenomeni simili sono stati documentati nel riconoscimento dei vocalizzi specie-specifici dei macachi giapponesi da Michael Petersen e collaboratori dell'Università dell'Indiana, mentre è noto fin dagli anni settanta, grazie al classico lavoro di Fernando Nottebohm della Rockefeller University, che in molti uccelli canori le strutture dell'emisfero di sinistra sono dominanti nella produzione del canto.

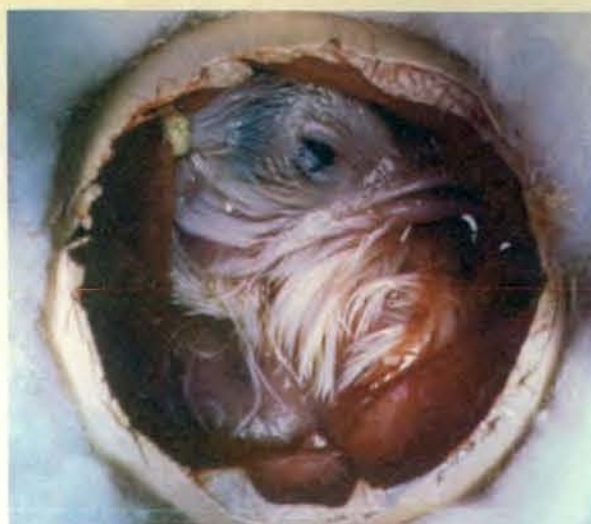
Ma perché è così importante che la lateralizzazione cerebrale sia presente anche in altre specie? Semplicemente perché la disponibilità di modelli animali potrebbe consentirci di rispondere alle due questioni fondamentali, finora irrisolte, che si pongono nell'esame di ogni fenomeno biologico: quella relativa alle cause immediate, neuropsicologiche, della lateralizzazione, e quella relativa alle cause remote, e cioè alla sua storia filogenetica.

Da che cosa è determinata nel sistema nervoso l'asimmetria cerebrale? Si tratta di un programma geneticamente prefissato? Che ruolo vi svolgono l'esperienza, i fattori ormonali, i processi di sviluppo? Una specie molto usata per cercare di rispondere a queste domande è il pulcino di pollo domestico, che presenta peculiari vantaggi soprattutto per lo studio dell'ontogenesi della lateralizzazione. L'asimmetria nel cervello del pulcino fu scoperta negli anni settanta da Lesley Rogers, allora alla Monash University e oggi all'Università del New England in Australia, studiando gli effetti della somministrazione di un inibitore della sintesi delle proteine, la cicloesammide, in un test standard di memoria noto come *pebble*

Un pulcino impegnato in un test di memoria (*pebble floor task*) deve distinguere tra cibo e sassolini di simile aspetto sparsi sul pavimento. Il compito è facile e il pulcino commette pochi errori quando può usare ambedue gli occhi o il solo occhio destro, mentre diventa più difficile quando la visione è confinata al solo occhio sinistro.

Il test del corridoio sviluppato nel laboratorio di uno degli autori. Pulcini di tre giorni con l'occhio sinistro temporaneamente occluso da un bendaggio appaiono incapaci di distinguere un conspecifico familiare - presentato loro nelle ore immediatamente successive alla schiusa - da uno estraneo (ciascuno confinato alle opposte estremità del corridoio dietro un vetro trasparente) e avvicinano indifferentemente ora l'uno ora l'altro. Lo stesso non accade quando è l'occhio destro a essere temporaneamente occluso da un bendaggio: in questo caso i pulcini scelgono di rimanere vicini al conspecifico familiare ed evitano di avvicinarsi all'estraneo. Il disegno è di Lucia Regolin.

floor task. Su un pavimento di plexiglas vengono distribuiti a caso granellini di cibo e sassolini (questi ultimi incollati al pavimento, e quindi non ingeribili). Dopo poche beccate, il pulcino impara a riconoscere il cibo in base a certi indizi visivi (forma, colore, tessitura). La somministrazione di cicloesammide nell'emisfero sinistro, o bilateralmente, annulla questa capacità: il pulcino becca a caso sassolini e granellini; la somministrazione nell'emisfero destro è invece priva di effetti. Richard Andrew, dell'Università del Sussex in Gran Bretagna, ha osservato che lo stesso risultato può essere ottenuto in un modo ancor più semplice. Basta occludere temporaneamente l'occhio destro o sinistro dell'animale con un bendaggio: quando il pulcino usa l'occhio destro, esso riesce a distinguere il cibo dai sassolini, cosa che non riesce a fare quando usa l'occhio sinistro. Questa tecnica sfrutta il fatto che negli uccelli le vie visive primarie ascendono in gran parte all'emisfero controlaterale, e cioè che le informazioni provenienti dalla retina dell'occhio sinistro sono elaborate dalle strutture nervose dell'emisfero destro mentre quelle provenienti dalla retina dell'occhio destro vengono elaborate dalle strutture nervose di sinistra. Sebbene negli uccelli vi siano vie di collegamento tra i due emisferi cerebrali, queste sono quantitativamente e qualitativamente inferiori rispetto a quelle presenti nei mammiferi placentati (in particolare, negli uccelli non è presente il grande fascio di fibre del corpo calloso che interconnette regioni omologhe dei due emisferi).

Ci si potrebbe chiedere se le asimmetrie rilevate nel pulcino non siano limitate a compiti visivo-motori molto semplici e quindi, in ultima analisi, difficilmente comparabili con le asimmetrie osservabili nelle prestazioni cognitive umane. Lavorando assieme a Richard Andrew, uno di noi (Vallortigara) ha però documentato asimmetrie nei processi di *imprinting* associate a prestazioni cognitive molto sofisticate. L'imprinting è quel fenomeno di rapido attaccamento sociale che i giovani uccelli delle specie nidifughe sviluppano nei confronti di qualsiasi oggetto cospicuo venga loro presentato subito dopo la nascita. Due pulcini allevati assieme anche per poche ore dopo la schiusa sono in grado, in base al solo processo di esposizione reciproca, di riconoscersi in qualunque altra occasione. Questa memoria di riconoscimento può essere evidenziata mediante un test in cui un pulcino viene posto al centro di un corridoio, alle cui estremità stanno, da una parte, il compagno di gabbia e, dall'altra, un pulcino estraneo. Il pulcino sottoposto a test tende ad avvicinarsi al conspecifico che gli è familiare, ma solo se può usare entrambi gli occhi, o il solo occhio sinistro. Se il test viene condotto limitando la visione all'occhio destro, il pulcino si sposta a caso tra l'uno e l'altro dei due conspecifici. Non tutti gli aspetti della memoria dell'oggetto di imprinting sembrano però perduti: il pulcino manifesta un normale interesse per i conspecifici e non sembra essere meno motivato ad avvicinarli. Semplicemente, l'emisfero sinistro del suo cervello non appare in grado di riconoscere un particolare conspecifico. Qualcosa di simile avviene nell'uomo a seguito di certe lesioni focali all'emisfero destro, che possono produrre un deficit nella capacità di riconoscere i volti familiari. (Nei galliformi, è opportuno sottolineare, il riconoscimento individuale è basato essenzialmente su indizi di tipo visivo, in particolare quelli disponibili nella regione del collo e della testa.)

Che cosa produce l'asimmetria nel cervello del pulcino? Il fatto che questa sia presente nell'animale così precocemente, a due-tre giorni di vita, potrebbe far pensare che ne siano responsabili i soli fattori genetici. Ma le cose non stanno così, perché i fattori ambientali sembrano avere un'influenza cruciale. Negli ultimi giorni prima della schiusa, l'embrione del pulcino è orientato nell'uovo in modo tale per cui il suo occhio sinistro è coperto dal corpo. L'occhio destro si trova allora a ricevere più luce del sinistro (una quantità variabile tra il 6 e il 10 per cento della luce incidente sulle uova passa attraverso il guscio, le membrane e la palpebra traslucida). Lesley Rogers ha dimostrato che pulcini provenienti da uova mantenute al buio durante il periodo critico in cui la luce sembra promuovere la crescita delle fibre nervose nelle vie visive (a partire dal diciannovesimo giorno di incubazione) non presentano asimmetrie nel test standard di memoria descritto in precedenza. I singoli pulcini sono ancora lateralizzati, nel senso che alcuni eseguono meglio il compito con l'occhio destro e altri col sinistro, ma non si verifica più che, come nel caso dei pulcini provenienti da uova esposte alla luce, la maggior parte degli individui sia lateralizzata nella stessa direzione (con dominanza dell'occhio destro e quindi dell'emisfero sinistro). Parrebbe, insomma, che i pulcini siano geneticamente predisposti a sviluppare l'asimmetria cerebrale, ma che sia un fattore di tipo embriologico-ambientale (l'esposizione asimmetrica alla luce nell'uovo) a determinare l'identico allineamento dell'asimmetria nella maggioranza degli individui. È possibile rovesciare sperimentalmente la direzione dell'asimmetria rimuovendo l'embrione prima della schiusa e occludendogli l'occhio destro, e lasciando invece il sinistro esposto alla luce. Dopo la nascita, questi pulcini eseguono meglio il *pebble floor task* usando l'occhio sinistro anziché il destro.

Le relazioni tra meccanismi genetici e fattori ambientali sembrano però essere più complesse nel caso dei processi di riconoscimento individuale associati all'imprinting. Lavorando con Lesley Rogers e Richard Andrew, abbiamo recentemente scoperto che i pulcini provenienti da uova esposte alla luce nei giorni immediatamente precedenti la schiusa presentano un'inversione dell'asimmetria (con l'emisfero sinistro dominante nel riconoscimento), mentre sono quelli provenienti da uova mantenute al buio che presentano la «normale» asimmetria a favore dell'emisfero destro. È possibile che per quel che riguarda i processi di imprinting l'esposizione alla luce determini la direzione dell'asimmetria, ma che i pulcini siano comunque asimmetrici sia che vengano o che non vengano esposti alla luce quando si trovano nell'uovo.

Le ricerche compiute dal gruppo diretto da Patrick Bateson e Gabriel Horn all'Università di Cambridge hanno dimostrato che nel pulcino le asimmetrie cerebrali possono venire indotte dall'esperienza associata all'esposizione a un oggetto di imprinting. Poche ore dopo l'esposizione vi è un incremento limitato al solo emisfero sinistro - in una piccola regione nota come iperstriato ventrale mediale intermedio (o IMHV, acronimo dei termini inglesi) - di recettori NMDA (un tipo di recettori per il glutammato, che prendono il nome dall'N-metil-D-aspartato, un agonista che si lega a questi recettori implicati nei processi di memoria; si veda l'articolo *Apprendimento e individualità: le basi biologiche* di E. R. Kandel e R. D. Hawkins in «Le Scienze» n. 291, novembre 1992). Nelle successive tre ore, parte della memoria dell'oggetto di imprinting viene traslocata all'emisfero destro, sebbene le esatte modificazioni sinaptiche che accompagnano questo processo siano ignote. A. N. Johnston, L. J. Rogers e P. R. Dodd dell'Università del New England hanno però scoperto che nei pulcini provenienti da uova mantenute al buio vi è una lateralizzazione che precede quella indotta dall'imprinting. I recettori NMDA sono due volte più numerosi nell'IMHV di destra che non in quello di sinistra prima dell'imprinting, mentre la situazione si rovescia dopo l'imprinting.

Richard Andrew e uno di noi (Vallortigara) hanno proposto che le memorie residenti nei due emisferi svolgano funzioni differenti: quelle localizzate nell'emisfero di sinistra registrerebbero le proprietà generali della categoria «partner sociali», quelle localizzate nell'emisfero di destra le proprietà specifiche di singoli individui entro la categoria (una forma di memoria «episodica»). Nei pulcini provenienti da uova mantenute al buio, la direzione dell'asimmetria sarebbe del tipo sinistra-destra, con formazione iniziale della memoria categoriale a sinistra, seguita poi da quella episodica a destra. Nei pulcini provenienti da uova esposte alla luce, la direzione sarebbe rovesciata, per cui il compito di riconoscere i singoli individui sarebbe di pertinenza dell'emisfero sinistro, mentre il destro conterrebbe la traccia di memoria generale relativa alla categoria dei membri della specie. I dati comportamentali sono in accordo con quest'ipotesi, mentre mancano ancora le prove a livello neurochimico. Se siamo nel giusto, i pulcini provenienti da uova esposte alla luce dovrebbero presentare asimmetrie recettoriali a favore dell'emisfero sinistro prima dell'imprinting, e a favore dell'emisfero destro (al quale sarebbero associati i fenomeni di plasticità sinaptica iniziale) dopo l'imprinting.

L'orientamento dell'embrione di pulcino nell'uovo nei tre giorni che precedono la schiusa mostra come l'occhio sinistro sia coperto dal corpo mentre quello destro rimanga esposto alla luce che attraversa il guscio e le membrane (la fotografia è stata gentilmente concessa da L. J. Rogers, del Brain and Behaviour Laboratory presso il Dipartimento di fisiologia dell'Università del New England, in Australia). Come mostrano i disegni, nel pulcino, così come negli altri uccelli, vi sono due vie visive: la via tetto-fugale (*in grigio*) le cui fibre nervose ascendono controlateralmente dalla retina al tetto ottico e poi al *nucleus rotundus* e all'*ectostriatum*, e la via talamo-fugale (*in azzurro*) le cui fibre ascendono in gran parte controlateralmente al talamo e di qui al cosiddetto wulst, ma che, in piccolo numero, si incrociano a livello della decussazione dorsale sopraottica convogliando informazioni visive anche all'emisfero ipsilaterale. L'esposizione asimmetrica alla luce prima della schiusa determina un'asimmetria anatomica nella via talamo-fugale, dove le fibre della decussazione dorsale sopraottica che dal talamo sinistro incrociano e raggiungono l'emisfero destro sono più numerose di quelle che dal talamo destro raggiungono l'emisfero sinistro. L'occhio destro, perciò, ha nel complesso migliori connessioni con gli emisferi cerebrali rispetto all'occhio sinistro, e ciò potrebbe spiegare la sua superiore abilità nel test illustrato nella figura al centro a pagina 55.

Veniamo ora alle cause remote dell'asimmetria. Perché è comparsa la lateralizzazione cerebrale? Qual è la sua funzione? E quando sarebbe comparsa per la prima volta? Oggi sappiamo che sia gli uccelli sia i mammiferi manifestano questo fenomeno; forse pressioni evolutive simili ne hanno determinato la comparsa in modo indipendente nelle due classi o, al contrario, potrebbe essere stato ereditato dagli uccelli e dai mammiferi da comuni antenati rettili.

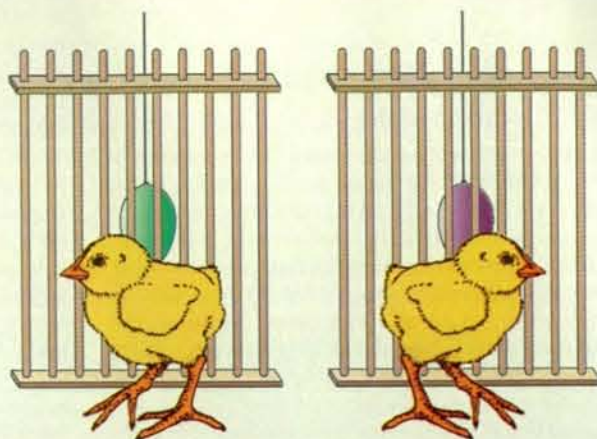
Da alcuni anni abbiamo avviato un programma di ricerca per indagare sulla possibile presenza di asimmetrie nel comportamento dei cosiddetti vertebrati inferiori (pesci, anfibi e rettili). Il risultato forse più interessante l'abbiamo ottenuto studiando un pesciolino d'acqua dolce, *Girardinus falcatus*, originario dell'America Meridionale. Assieme a Claudio Cantalupo, già studente nel laboratorio di uno di noi (Bisazza) e oggi all'Università di Memphis, abbiamo messo a punto un semplice dispositivo sperimentale per studiare la risposta di fuga dal predatore in questa specie. L'apparizione improvvisa di fronte al pesce della sagoma di un predatore determina un brusco scarto laterale seguito dalla fuga. *Girardinus* ancora immaturi mostrano una tendenza, a livello di popolazione, a fuggire verso destra durante le prime presentazioni dello stimolo; l'asimmetria progressivamente diminuisce con il procedere delle prove per poi rovesciarsi, con una tendenza a fuggire verso sinistra dopo quattro sessioni di una sessantina di presentazioni dello stimolo ciascuna. Gli animali adulti manifestano simili asimmetrie, con la differenza che quella iniziale (verso destra) è meno pronunciata. È possibile che ciò sia in relazione con le esperienze di fuga dai predatori reali compiute dagli adulti.

È difficile al momento decidere se l'asimmetria di *Girardinus* sia di tipo motorio o sensoriale (per esempio legata all'uso preferenziale di un occhio nella fissazione laterale di uno stimolo pericoloso). Ma il punto importante, in questa fase iniziale, è la documentazione dei fenomeni.

Dopo la pubblicazione del nostro lavoro, sono giunte da altri laboratori varie conferme dell'esistenza di asimmetrie comportamentali nei pesci. Adam Miklosi dell'Università «Eötvös» in Ungheria e Richard Andrew dell'Uni-

I vantaggi dell'asimmetria del cervello

Le asimmetrie cerebrali del pulcino non sono semplicemente curiosità rilevabili in condizioni artificiose quali quelle della visione limitata a un solo occhio. Esse svolgono un ruolo importante nella vita quotidiana dell'animale. Un sorprendente esempio di ciò è stato fornito recentemente da Lucia Regolin e Piero Pagni dell'Università di Padova, lavorando con uno di noi (Vallortigara). Pulcini di due giorni allevati fin dalla schiusa con una pallina colorata che funge da partner sociale, per ricongiungersi all'oggetto di imprinting aggirano una barriera sul lato sinistro quando la pallina è assolutamente identica a quella di allevamento e su quello destro quando il colore della pallina venga modificato. Il fenomeno sembra dovuto al fatto che il pulcino tende a fissare gli oggetti familiari con l'occhio destro (convogliando le informazioni in prevalenza all'emisfero cerebrale sinistro) e gli oggetti nuovi con l'occhio sinistro (convogliando le informazioni in prevalenza all'emisfero cerebrale destro).

Nei pulcini la retina di ciascun occhio comprende almeno due zone di elevata sensibilità, una frontale e una laterale. La zona frontale (verso il becco) consente un certo grado di sovrapposizione e messa in corrispondenza delle immagini viste da ciascun occhio: ciò che viene chiamato visione binoculare. Le informazioni che giungono su questa parte delle due retine interessano quindi ambedue gli emisferi cerebrali. (Tuttavia anche nel campo binoculare ciascun occhio può a volte ricevere ed elaborare le informazioni visive in maniera indipendente perché i pulcini, come altri uccelli, sono capaci di muovere i due occhi in maniera indipendente.) La parte laterale di ciascuna retina, invece, comunica prevalentemente con l'emisfero cerebrale del lato opposto della testa. Il pulcino quindi dispone di una semplice strategia per far sì che un certo stimolo venga analizzato, ad esempio, dall'emisfero cerebrale sinistro: basta che fissi lo stimolo utilizzando il campo di visione laterale dell'occhio destro. In questo modo esso può «mettere in azione» l'emisfero appropriato per una particolare condizione o per un particolare tipo di stimolo.

Tutto ciò può sembrare strano per noi mammiferi, abituati come siamo a fissare binocularmente qualsiasi stimolo susciti il nostro interesse. Tuttavia, anche noi utilizziamo un meccanismo in certo modo simile a quello del pulcino quando, muovendo il capo e gli occhi, orientiamo lo sguardo nell'emispazio controlaterale all'emisfero che deve essere attivato. Marcel Kinsbourne dell'Università di Boston ha scoperto che quando debbono risolvere problemi di tipo verbale, le persone dirigono lo sguardo e il capo verso destra (attivando l'emisfero sinistro), mentre il contrario accade con problemi di tipo spaziale. Nei mammiferi, quindi, gli aggiustamenti della posizione della testa e i movimenti volontari degli occhi potrebbero svolgere un ruolo simile a quello che negli uccelli viene svolto dalla scelta di usare il campo di visione laterale destro o sinistro.

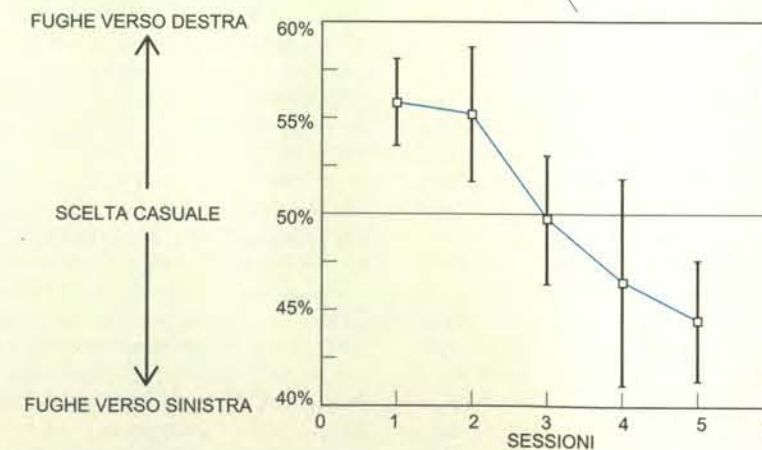
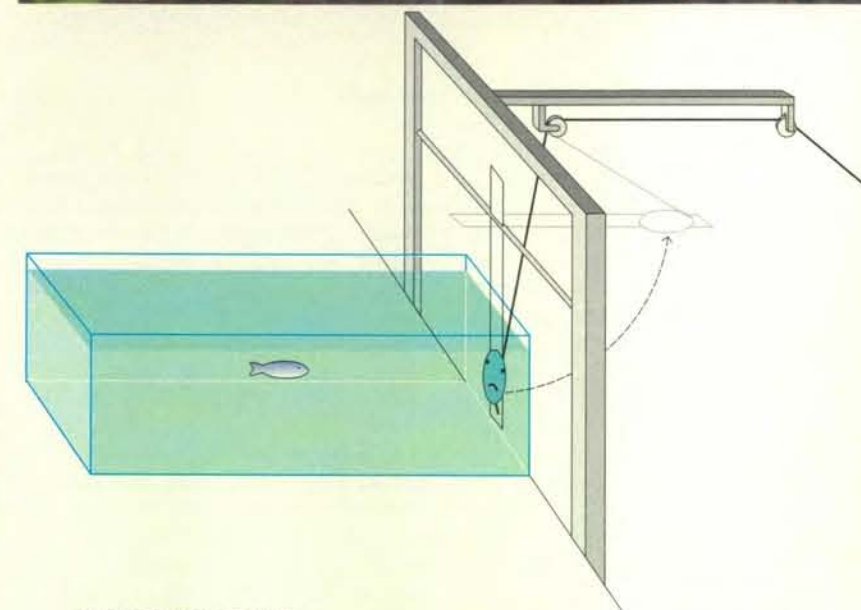
versità del Sussex hanno scoperto che il pesce zebra (*Brachydanio rerio*) usa preferenzialmente l'occhio sinistro per fissare stimoli nuovi. Andy Green della Stazione zoologica di Donora in Spagna ha osservato che il tritone maschio (*Triturus vulgaris*) si gira preferenzialmente verso sinistra durante la deposizione della spermatofora. Infine, nel pesce gatto (*Ictalurus punctatus*) Michael Fine e i suoi collaboratori dell'Università della Virginia hanno scoperto che vi è un uso preferenziale della pinna pettorale sinistra nella produzione dei suoni stridulatori caratteristici della specie (preferenza che non sembra legata ad un'asimmetria anatomica delle pinne medesime).

Anche i rettili e gli anfibi paiono essere lateralizzati. Wallace Deckel dell'Università del Connecticut ha esaminato quale sia il lato favorito dal camaleonte americano (*Anolis*) durante le parate aggressive laterali che si verificano in occasione degli incontri tra maschi. I camaleonti prediligono fissarsi con l'occhio sinistro durante queste esibizioni aggressive (ma non durante altri tipi di interazione); inoltre, la variazione di colore del corpo che è normalmente associata alle esibizioni aggressive pare essere più pronunciata quando gli animali si fissano con l'occhio sinistro. Fenomeni simili sono stati descritti negli uccelli e nei mammiferi. Lance Workman dell'Università di Glamorgan nel Galles e Lesley Rogers dell'Università del New England in Australia hanno scoperto che, nei polli adulti, la probabilità di comportamenti di tipo aggressivo è molto più elevata quando questi fissano un conspecifico usando l'occhio sinistro piuttosto che il destro. Victor Denenberg dell'Università del Connecticut ha invece trovato che il comportamento di uccisione di topi si verifica molto meno frequentemente nei ratti con lesioni dell'emisfero destro che non dell'emisfero sinistro.

Richard Bauer, dell'Università del Tennessee, ha recentemente dimostrato che anche gli anfibi anuri presentano asimmetrie cerebrali. Quando un maschio della specie *Rana pipiens* monta per errore un altro maschio, quest'ultimo si difende emettendo vocalizzi caratteristici. I vocalizzi sembrano essere mediati dai neuroni dell'area pretrigeminale, localizzati appena anteriormente ai bordi del tetto ottico e del cervelletto. Bauer ha trovato che la riduzione nell'emissione di vocalizzi è molto più pronunciata quando una lesione dell'area pretrigeminale venga fatta a sinistra che non quando venga fatta a destra. Quindi, animali così diversi quali le rane, gli uccelli canori, i topi, i macachi giapponesi e gli uomini mostrano tutti una dominanza delle strutture cerebrali di sinistra nel controllo della produzione delle loro vocalizzazioni specie-specifiche. Chiaramente, non è il possesso del linguaggio verbale in quanto tale (che certo non appartiene ai topi, ai macachi o alle rane) a determinare l'asimmetria cerebrale, ma forse certi aspetti dell'elaborazione temporale di sequenze motorie che sono comuni a forme di comunicazione anche molto diverse tra loro.

L'aspetto più saliente della lateralizzazione comportamentale umana è comunque certamente dato dall'uso preferenziale della mano destra in una varietà di compiti. Si stima comunemente che più del 90 per cento degli individui della nostra specie sia destrimane. Linda F. Marchant, William C. McGrew e Irenäus Eibl-Eibesfeldt del Max-Planck-Institut di Monaco di Baviera hanno recentemente studiato l'uso spontaneo delle mani in una varietà di situazioni in tre diverse culture tradizionali (i G/wi San del Botswana, gli Himba della Namibia e gli Yanomamo del Venezuela). Questi autori hanno osservato che, sebbene la dominanza della mano destra appaia in tutte queste culture e rappresenti quindi con ogni probabilità un tratto universale della specie, in molti casi di uso spontaneo delle mani questa asimmetria supera di poco il 50 per cento. Fa eccezione l'uso di strumenti, e in particolare la loro manipolazione fine, la sola attività ad avvicinarsi alle proporzioni solitamente evidenziate dagli psicologi nei test standard di dominanza manuale nella nostra cultura.

Per parecchio tempo si è ritenuto che fenomeni simili fossero del tutto assenti negli altri animali, a parte il caso, ben noto, delle asimmetrie che possono comparire a livello individuale. I possessori di animali domestici hanno spesso notato che il loro gatto o il loro cane manifestavano una preferenza per l'uso di una zampa in taluni comportamenti, ma si riteneva comunemente che, a livello di popolazione, la distribuzione di individui destrimani e mancini fosse la stessa, e che le asimmetrie riflettessero perciò eventi di tipo casuale.

È curioso che ci sia voluto tanto tempo per smentire questo punto di vista, giacché è noto da almeno tre secoli un caso di uso preferenziale di un arto tra gli uccelli, che si presenta con frequenze del tutto paragonabili a quelle della dominanza manuale umana. La gran parte delle specie di pappagalli, sia sudamericane sia australiane, usa infatti la zampa sinistra per reggere il cibo mentre questo viene beccato. La preferenza per l'uso dell'arto sinistro stimata in una varietà di specie di pappagalli si aggira attorno al 90 per cento degli individui della popolazione. La documentazione di fenomeni simili nei primati è molto più recente. Essa è stata resa difficile dal mancato apprezzamento iniziale del fatto che l'uso della zampa destra o sinistra in un certo compito dipende in buona misura dal compito stesso. Jeannette Ward dell'Università di Memphis è stata la prima a osservare che nei galagoni e in varie altre specie di proscimmie l'arto anteriore sinistro viene usato preferenzialmente per raggiungere il cibo, in particolare quando l'operazione viene eseguita in postura bipede. Nelle scimmie antropomorfe,

Apparato sperimentale utilizzato nel laboratorio degli autori per studiare le preferenze laterali nelle reazioni di fuga del pesce d'acqua dolce *Girardinus falcatus*. Il «predatore» era uno zimbello composto da un ellissoide con tre zone scure a rappresentare, rispettivamente, un paio d'occhi e una bocca. Lo zimbello poteva essere rapidamente calato di fronte al pesce quando questo si trovava nel centro della vasca e orientato perpendicolarmente alla parete frontale. Nel disegno sono raffigurate le percentuali di fughe a destra (sopra il 50 per cento) e a sinistra (sotto il 50 per cento) in quattro consecutive sessioni costituite ciascuna di 60 presentazioni successive del predatore. Come si può vedere, all'inizio i pesci fuggono prevalentemente verso destra e poi, con il procedere delle prove, verso sinistra.

Un rospo comune europeo (*Bufo bufo*) impegnato nel laboratorio degli autori a rimuovere dal proprio muso una strisciolina di carta. Il rospo usa preferenzialmente la zampa anteriore destra nella rimozione della strisciolina. Lo stesso accade quando deve rimuovere un palloncino di gomma che gli ricopre completamente il capo.

oltre alla preferenza per la zampa sinistra nel raggiungere il cibo, è ora ben documentata anche la preferenza di quella destra nelle attività di manipolazione, particolarmente nei casi in cui sia richiesta un'attività coordinata di entrambe le mani. Per esempio, William D. Hopkins dello Yerkes Regional Primate Center ad Atlanta ha recentemente studiato un gruppo di 110 scimpanzé in un compito che richiedeva agli animali di estrarre burro di arachidi da un tubo di vetro: tipicamente, gli animali reggevano il tubo con la zampa sinistra e usavano l'indice della zampa destra per estrarne il contenuto.

Quanto antiche potrebbero essere le asimmetrie nell'uso degli arti? Difficile dirlo con certezza, ma ricerche recenti suggeriscono che esse potrebbero essere comparse già con i primi tetrapodi. Assieme a Claudio Cantalupo e ad Andrew Robins e Lesley Rogers dell'Università del New England abbiamo studiato l'uso delle zampe in alcune specie di rospi. In Italia abbiamo studiato il rospo comune, *Bufo bufo*, in due tipi di test. Nel primo si osservava quale zampa anteriore l'animale utilizzasse per liberarsi di un palloncino di gomma che gli ricopriva tutta intera la testa. Nel secondo, si osservava quale zampa veniva usata per rimuovere un pezzetto di carta appiccicato sul muso nella regione della bocca. In tutti e due i test, i rospi mostravano una significativa preferenza, a livello di popolazione, per l'uso della zampa destra. Le percentuali si aggirano tra il 55 e il 60 per cento, ma questo non deve sorprendere, giacché è improbabile attendersi da un rospo grandi attitudini manipolative. A che cosa potrebbe servire a un rospo preferire la zampa destra per pulirsi il muso? T. Naitoh dell'Università di Shimane in Giappone e R. Wassersug della Dalhousie University in Canada hanno fatto osservare che gli anfibi anuri rigurgitano l'intero stomaco per liberarlo delle sostanze tossiche eventualmente ingerite; poiché lo stomaco è asimmetrico, con un mesenterio più corto a destra che non a sinistra, lo stomaco tende a essere emesso a destra piuttosto che a sinistra. Tuttavia, sebbene sia possibile che l'asimmetria nell'uso delle zampe sia utilmente associata ai riflessi emetici, è improbabile che i rospi usino asimmetricamente le zampe a causa dell'asimmetria viscerale. Infatti, in un'altra specie, *Bufo marinus*, studiata dai colleghi australiani, non compare alcuna asimmetria nel test di rimozione della strisciolina di carta: i rospi usano indifferentemente la zampa destra e la sinistra (sebbene essi presentino la soprammenzionata asimmetria viscerale). Ciò non significa che questi rospi non siano lateralizzati: lo sono infatti, ma in un altro tipo di test. Se si rovescia *Bufo marinus* pancia all'aria e lo si immerge in acqua in modo tale che rimanga appeso a un supporto con entrambe le zampe, per raddrizzarsi esso rilascia il supporto con la zampa sinistra ed usa quella destra per ruotare e girarsi in posizione diritta. Questa asimmetria è quantitativamente molto più pronunciata di quella associata alla pulizia del muso di *Bufo bufo*, interessando tra il 66 (quando si misuri il lato di emersione) e l'80 per cento (quando si misuri la zampa rilasciata per prima) degli individui della popolazione.

Sembra evidente, a questo punto, che la storia evolutiva della lateralizzazione cerebrale debba essere di molto retrodatata. È difficile, e comunque poco economico, pensare che essa possa essere stata scoperta e riscoperta indipendentemente nelle varie classi di vertebrati. Molto più probabilmente la lateralizzazione ha accompagnato lo sviluppo del sistema nervoso fin dai suoi albori, da quando questo ha duplicato se stesso in una struttura bisimmetrica rispetto all'asse sagittale. È ovvio inoltre che il linguaggio verbale e la dominanza manuale non possono più essere considerati le cause della comparsa della lateralizzazione. L'ipotesi più probabile è che le origini dell'asimmetria del sistema nervoso siano di tipo percettivo-motorio. Animali a simmetria bilaterale come i pesci e i rettili - e i loro antenati - si caratterizzano per il fatto che le informazioni che giungono ai due occhi sono scarsamente integrate e integrabili. Ciò sia per la posizione laterale degli occhi sia per la relativa scarsità di connessioni tra le parti destra e sinistra dell'encefalo. Per evitare che emergano conflitti nell'esecuzione delle risposte quando stimoli diversi vengono percepiti simultaneamente dai due occhi, diventa allora essenziale che una metà del sistema nervoso sia dominante nel controllo dell'azione. È ragionevole supporre che la metà implicata nel controllo dell'azione debba essere quella che si occupa della categorizzazione delle esperienze, particolarmente laddove si richiedono risposte rapide e appropriate (come quando si debba decidere se un certo stimolo sia o non sia un predatore, un conspecifico, del cibo e così via). Questa metà sembrerebbe essere, nella gran parte dei vertebrati, la metà (o emisfero, dove la dizione sia appropriata) sinistra. Il linguaggio stesso, per il quale certo si possono trovare molte funzioni e spiegazioni, è indubitabilmente il più sofisticato dei mezzi di categorizzazione del mondo che la selezione naturale abbia mai sviluppato. Non è quindi sorprendente che esso sia associato alle funzioni dell'emisfero sinistro, all'emisfero, cioè, deputato al controllo dell'azione. Altre funzioni sono rimaste così disponibili per l'altra metà dell'encefalo, in particolare quelle connesse alla formazione di memorie di specifici episodi di esperienza (come quelle associate al riconoscimento individuale e alla formazione delle rappresentazioni spaziali dell'ambiente) in quanto distinte dalle memorie «categoriali» che riuniscono le proprietà invarianti comuni a diverse esperienze. Al momento, questa ricostruzione è largamente speculativa, ma è comunque in grado di spiegare piuttosto bene le nostre conoscenze sulla lateralizzazione nei vertebrati. Non è eccessivamente ottimistico ritenere che nei prossimi anni potremo chiarire del tutto uno tra gli enigmi più difficili e affascinanti della moderna scienza della mente e del cervello.

GIORGIO VALLORTIGARA si è specializzato nello studio della neurobiologia comparata dei processi cognitivi lavorando presso il Centre for Neuroscience dell'Università del Sussex, in Gran Bretagna. Attualmente è ricercatore all'Università di Udine e insegna psicologia animale e comparata all'Università di Trieste.

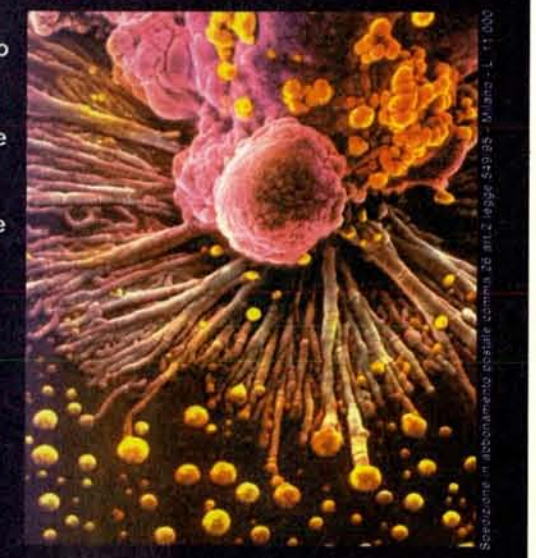
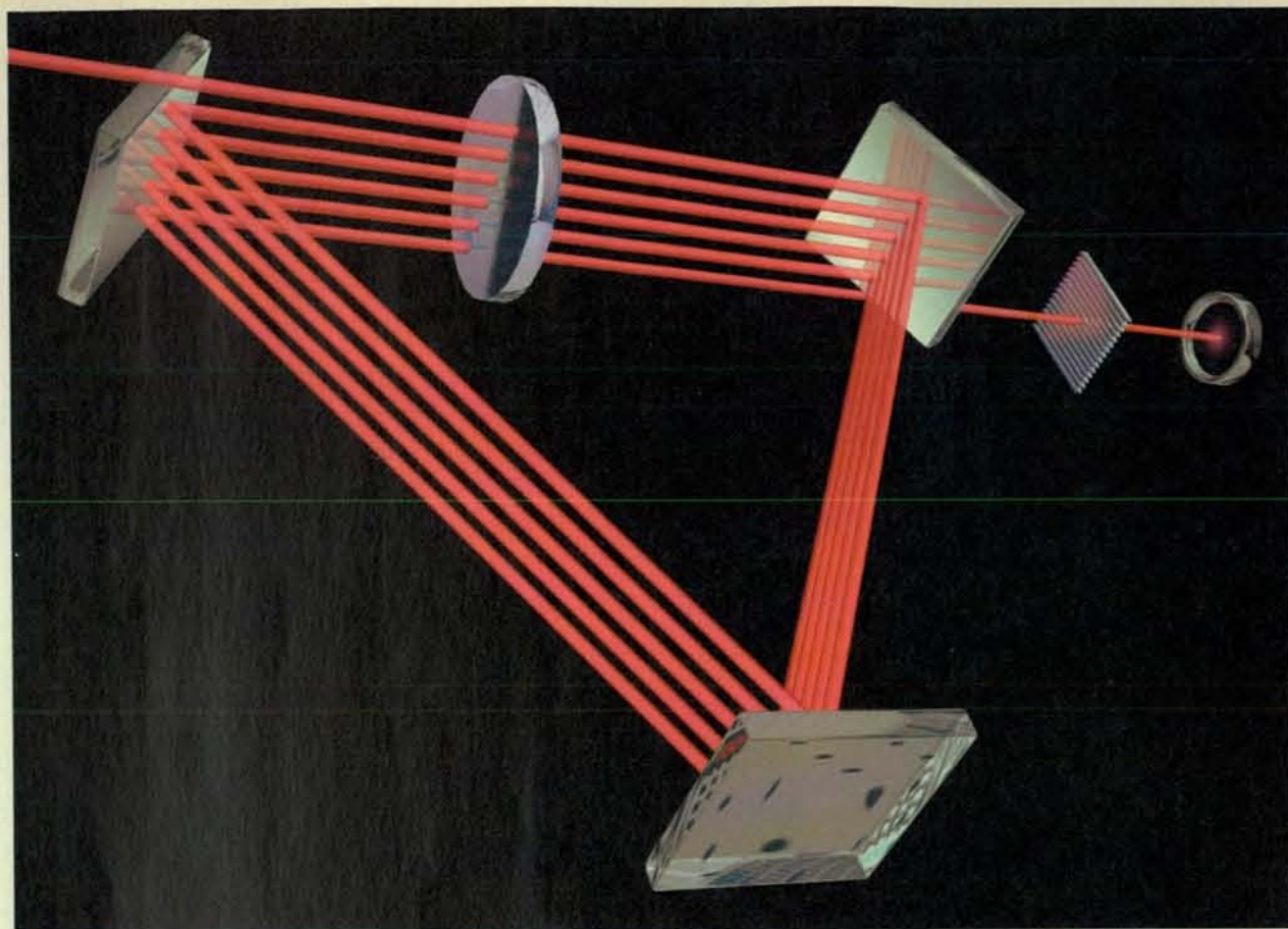
ANGELO BISAZZA è ricercatore all'Università di Padova, dove insegna psicologia animale e comparata. Oltre che di lateralizzazione emisferica nei vertebrati si occupa del comportamento riproduttivo nei pesci e dell'evoluzione dei caratteri sessuali secondari negli animali.

VALLORTIGARA G. e ANDREW R. J., *Lateralization of Response by Chicks to Change in a Model Partner,* in «Animal Behaviour», 41, pp. 187-194, 1991.

BRADSHAW J. L. e ROGERS L. J., *The Evolution of Lateral Asymmetries, Language, Tool Use and Intellect*, Academic Press, San Diego, 1993.

CANTALUPO C., BISAZZA A. e VALLORTIGARA G., *Lateralization of Predator-Evasion Response in a Teleost Fish,* in «Neuropsychologia», 33, pp. 1637-1646, 1995.

BISAZZA A., CANTALUPO C., ROBINS A., ROGERS L. J. e VALLORTIGARA G., *Right-Pawedness in Toads*, in «Nature», 379, 1 febbraio 1996.

VALLORTIGARA G., REGOLIN L., BORTOLOMIOL G. e TOMMASI L., *Lateral Asymmetries due to Preferences in Eye Use during Visual Discrimination Learning in Chicks,* in «Behavioural Brain Research», 74, pp. 135-143, 1996.

Michael Goodman

Vedere nel buio con la meccanica quantistica

L'ottica quantistica dimostra la possibilità di eseguire misurazioni prive di interazione, ovvero rivelare la presenza di oggetti senza che la luce - o altro - venga in contatto con essi

di Paul Kwiat, Harald Weinfurter e Anton Zeilinger

Nella mitologia greca, l'eroe Perseo deve affrontare un compito non invidiabile: combattere con la terribile Medusa. Il mostro dalla chioma di serpenti è così orribile che basta una semplice occhiata per essere immediatamente tramutati in pietra. In una versione del racconto, Perseo riesce a evitare questo destino usando astutamente il proprio scudo per riflettere l'immagine di Medusa verso la creatura stessa, trasformandola in pietra. Ma che cosa sarebbe accaduto se Perseo non avesse avuto un'armatura lucidata a puntino?

Probabilmente avrebbe dovuto soccombere al fato. Se avesse chiuso gli occhi, non sarebbe stato in grado di vedere il suo bersaglio. E lanciando anche solo un'occhiata furtiva avrebbe permesso a un poco della luce che colpiva Medusa di riflettersi nei suoi occhi; avendo così «visto» il mostro, sarebbe stato perduto.

Nel mondo della fisica, questa difficile situazione potrebbe essere riassunta da un'affermazione, apparentemente innocua e quasi ovvia, formulata nel 1962 dal premio Nobel Dennis Gabor, inventore dell'olografia. In sostanza, Gabor affermava che nessuna osservazione può avere luogo senza che almeno un fotone - la particella elementare, o quanto, di luce - colpisca l'oggetto osservato.

Ma negli ultimi anni i fisici che lavorano nel campo sempre più sorprendente dell'ottica quantistica hanno imparato che non solo tale affermazione non è per niente ovvia, ma è anche di fatto sbagliata. Oggi infatti sappiamo determinare la presenza di un oggetto senza che un solo fotone lo colpisca.

Un fascio laser che incide su un fotorivelatore dopo aver percorso un cammino a spirale illustra il cosiddetto effetto Zenone quantistico, che interviene nelle misurazioni senza interazione.

Parlare di misurazioni prive di interazione può sembrare un'assurdità: se non c'è interazione, come si può effettuare una misurazione? È una domanda sensata in meccanica classica, il settore della fisica che descrive il moto di palle, pianeti e altri oggetti di dimensioni non troppo piccole. Ma in meccanica quantistica - la scienza che studia gli elettroni, i fotoni e le altre particelle del mondo atomico - le cose vanno altrimenti. Di fatto, sfruttando la meccanica quantistica e realizzando apparecchiature sperimentali appropriate, si possono realizzare misurazioni senza interazione. Se Perseo fosse stato armato di qualche conoscenza di fisica quantistica, avrebbe trovato un modo per «vedere» Medusa senza che la luce dovesse realmente colpire la Gorgone e poi riflettersi nei suoi occhi: avrebbe potuto vedere senza guardare.

Questi «giochi di prestigio» quantistici offrono numerosi spunti per costruire rivelatori che potrebbero essere usati nel mondo reale; e forse ancora più interessanti sono le stupefacenti implicazioni filosofiche del fenomeno. Applicazioni e implicazioni si comprendono meglio a livello di esperimenti ideali: analisi semplificate che contengono tutti gli aspetti essenziali di un esperimento reale, ma senza le complicazioni della realizzazione pratica.

Come esempio di esperimento ideale, consideriamo un gioco nel quale si hanno due gusci di noce e un sassolino nascosto sotto uno di essi. Il sassolino, naturalmente, è un po' speciale: si trasforma in polvere se esposto alla luce. Il giocatore deve indovinare dov'è nascosto senza fargli prendere luce o perturbarlo in qualsiasi modo; se il sassolino si trasforma in polvere, il giocatore perde.

All'inizio il compito può sembrare impossibile, ma ci accorgiamo rapidamente che, se il giocatore si accontenta di vincere in metà dei tentativi, allora esiste una strategia semplice, consistente nel sollevare il guscio che egli presume non nasconda il ciottolo. Se ha indovinato, allora sa, senza vederlo, che il ciottolo si trova sotto l'altro guscio. Naturalmente una vittoria ottenuta con questa strategia altro non è che frutto di un'intuizione fortunata.

Ora modifichiamo un po' il gioco, semplificandolo in apparenza, ma rendendolo in realtà impossibile per un giocatore che limiti le proprie conoscenze alla fisica classica. Abbiamo solo un guscio, sotto il quale, in modo casuale, può trovarsi o meno il sassolino. Il giocatore deve riuscire a dire se il sassolino c'è o non c'è, sempre senza esporlo alla luce.

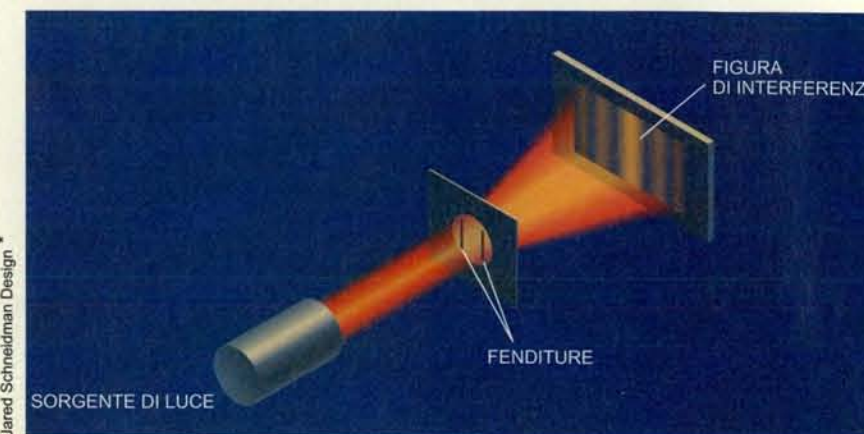
Supponiamo che sotto il guscio ci sia un sassolino. Se il giocatore non guarda, non avrà alcuna informazione; se guarda, allora sa che il sassolino era lì, ma lo avrà necessariamente esposto alla luce, e dunque troverà solo un mucchietto di polvere. Si può cercare di affievolire la luce, in modo che abbia scarse probabilità di colpire il sassolino; ma perché lo si possa vedere, per definizione almeno un fotone deve arrivare a colpirlo, provocando un'inevitabile sconfitta.

Per rendere il gioco più drammatico, Avshalom C. Elitzur e Lev Vaidman, due fisici dell'Università di Tel Aviv, hanno immaginato che il sassolino fosse una «superbomba» che sarebbe esplosa se fosse stata colpita anche da un solo fotone. Il problema allora diventa indovinare se un sasso-bomba si trovi sotto un guscio, senza farlo esplodere.

Elitzur e Vaidman furono i primi ricercatori a trovare una soluzione al problema. La loro risposta è valida, al più, per metà del tempo; tuttavia è stata essenziale per dimostrare la reale possibilità di vincere il gioco.

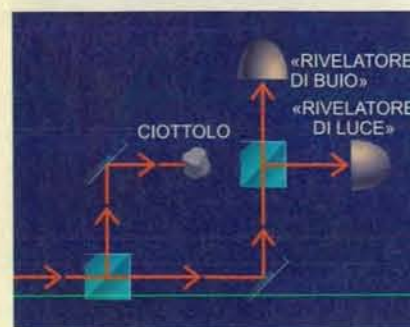
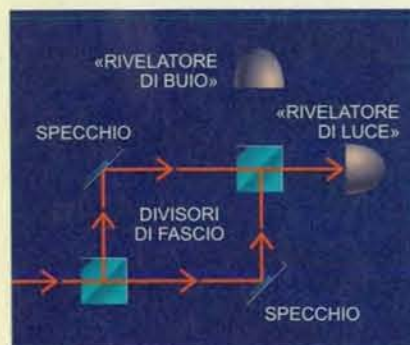
Il metodo da loro proposto sfrutta la duplice natura della luce. Abbiamo già detto che essa è costituita da fotoni, il che implica un aspetto particellare; ma la luce manifesta chiaramente anche caratteristiche ondulatorie, in particolare quando si verifica interferenza. Questo fenomeno riguarda il modo in cui due onde si sommano l'una all'altra. Ad esempio, nel noto esperimento delle due fenditure, la luce viene diretta su uno schermo lontano, dopo averla fatta passare attraverso due fenditure disposte l'una sopra l'altra. Sullo schermo si delineano frange luminose e frange scure: le prime corrispondono ai punti dove le creste e i ventri delle onde che escono

Jared Schneidman Design

Si verifica interferenza quando si usa un laser per illuminare due fenditure, generando fronti d'onda concentrici che interferiscono gli uni con gli altri (*in alto*). Le onde possono sommarsi costruttivamente o distruttivamente (*qui sopra*), generando la caratteristica figura di interferenza a bande luminose e scure (*in basso*).

Jared Schneidman Design

Il gioco dei gusci di noce è un esperimento ideale che illustra le potenzialità delle misurazioni senza interazione. Sotto un guscio può essere nascosto un sassolino speciale; se la luce lo tocca, questo si trasforma in polvere. Come si può determinare sotto quale guscio si nasconde il sassolino?

L'esperimento di Elitzur-Vaidman dà a ogni fotone la scelta fra due possibili percorsi. Gli elementi ottici sono disposti (*qui sotto*) in modo che i fotoni vadano a finire sempre nel «rivelatore di luce» (che corrisponde all'interferenza costruttiva) e mai nel «rivelatore di buio» (che corrisponde all'interferenza distruttiva). La presenza di un ostacolo lungo uno dei percorsi, però, fa sì che occasionalmente un fotone raggiunga il rivelatore di buio (*in basso*): si ha così una misurazione senza interazione.

Jared Schneidman Design

da una fenditura si sommano costruttivamente con le creste e i ventri delle onde provenienti dall'altra fenditura. Le bande scure rappresentano interferenza distruttiva, dove le creste delle onde uscenti da una fenditura si elidono con i ventri di quelle provenienti dall'altra. Un altro modo di esprimere questo concetto è dire che le frange luminose corrispondono ad aree dello schermo che hanno un'alta probabilità di essere colpite da un fotone, mentre le frange scure si trovano in aree che hanno una bassa probabilità di venirne colpite.

Secondo le regole della meccanica quantistica, si ha interferenza ogni volta che un evento ha più di un modo per fornire un certo risultato, ma non vi è alcun mezzo per distinguerli (questa definizione è più generale di quella che normalmente si trova nei libri di testo). Nell'esperimento delle due fenditure, la luce ha due modi per raggiungere lo schermo (passare dalla fenditura superiore o da quella inferiore), e non viene fatto alcun tentativo per determinare quale fotone passi attraverso quale fenditura. Se potessimo stabilirlo, non ci sarebbe interferenza, e ogni fotone terminerebbe la sua traiettoria in un punto qualsiasi dello schermo senza che si formino frange. In altre parole, in assenza di due traiettorie indistinguibili non ci può essere interferenza.

Per costruire l'apparecchiatura del loro esperimento ideale, Elitzur e Vaidman partono da un interferometro, ossia uno strumento che consiste di due specchi e due divisori di fascio. La luce che entra nell'interferometro colpisce un divisore di fascio, che invia il fascio lungo due percorsi ottici: uno superiore e uno inferiore. I percorsi si riuniscono nel secondo divisore di fascio, che manda la luce a uno di due fotorivelatori. Dunque l'interferometro dà a ogni fotone due cammini possibili fra la sorgente luminosa e il rivelatore.

Se si fa in modo che le lunghezze dei due percorsi attraverso l'interferometro siano esattamente uguali, l'apparecchio realizza effettivamente l'esperimento delle due fenditure. La differenza principale è che i due fotorivelatori prendono il posto dello schermo su cui compaiono le frange luminose e scure. Un rivelatore è messo in una posizione tale da rivelare solo i fotoni equivalenti alle frange luminose di una figura di interferenza (chiamiamolo «rivelatore di luce»); l'altro, il «rivelatore di buio», corrisponde invece alle frange scure, ovvero non è colpito da alcun fotone.

Che cosa accade se si pone un «sassolino» nel mezzo di una delle due traiettorie, per esempio in quella superiore? Se supponiamo che il primo divisore di fascio agisca casualmente, c'è una probabilità del 50 per cento che un fotone segua il cammino superiore, colpisca l'ostacolo (ovvero faccia esplodere la superbomba) e non giunga mai al secondo divisore di fascio.

Se viceversa il fotone percorre il cammino inferiore, non colpisce il sassolino. Inoltre non c'è più interferenza al secondo divisore di fascio, perché il fotone ha un unico percorso possibile per arrivarci. Pertanto, in corrispondenza del secondo divisore di fascio il fotone fa un'altra scelta casuale. Può essere riflesso e colpire il rivelatore di luce; questo risultato non dà alcuna informazione, perché si sarebbe verificato in ogni caso se l'ostacolo non fosse stato presente. Il fotone può andare però a colpire il rivelatore di buio; se ciò si verifica, sappiamo con certezza che c'era un oggetto su uno dei percorsi dell'interferometro, perché altrimenti il rivelatore di buio non avrebbe dato un segnale. E poiché il fotone era uno solo, ed è arrivato al rivelatore di buio, non può aver toccato l'ostacolo. Con questo metodo siamo dunque riusciti a fare una misurazione senza interazione: abbiamo determinato la presenza del sassolino senza agire su di esso.

Benché questo stratagemma funzioni solo alcune volte, bisogna sottolineare che, in quei casi, funziona perfettamente. La magia della meccanica quantistica che sottende questo fenomeno è che tutto, luce inclusa, ha una duplice natura, di onda e di particella. Quando non sono presenti ostacoli, la luce si comporta come un'onda. Può arrivare ai rivelatori simultaneamente lungo entrambe le traiettorie, provocando il fenomeno di interferenza. Quando il sassolino è in posizione, la luce si comporta come una particella indivisibile e percorre una sola delle due traiettorie. Basta la sola presenza dell'ostacolo ad annullare la possibilità di interferenza, anche se il fotone non ha necessariamente avuto un'interazione con esso.

Per verificare l'idea di Elitzur e Vaidman, noi e Thomas Herzog, ora all'Università di Ginevra, abbiamo realizzato due anni fa una versione reale del loro esperimento ideale, dimostrando che è possibile costruire apparecchi per misurazioni senza interazione. La sorgente di singoli fotoni era uno speciale cristallo ottico non lineare. Quando i fotoni ultravioletti prodotti da un laser attraversavano il cristallo, venivano talora convertiti in due fotoni «figli» di energia inferiore, che si propagavano lungo traiettorie inclinate di 30 gradi l'una rispetto all'altra. Rivelando la presenza di uno di questi fotoni, eravamo assolutamente certi dell'esistenza dell'altro fotone, che dunque utilizzavamo per il nostro esperimento.

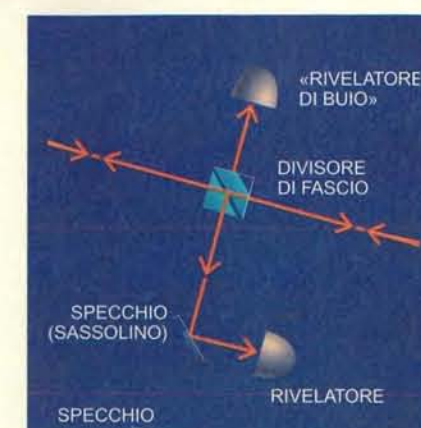
Il fotone entrava in un interferometro (per semplicità, utilizzavamo un tipo di apparecchio leggermente diverso da quello proposto da Elitzur e Vaidman). Gli specchi e il divisore di fascio erano allineati in modo tale che quasi tutti i fotoni uscivano dall'interferometro nella stessa direzione in cui vi erano entrati (l'equivalente di andare al rivelatore di luce nell'esempio di Elitzur-Vaidman o, nell'esperimento delle due fenditure, di finire in una frangia luminosa). In assenza dell'ostacolo, la probabilità che un fotone arrivasse al rivelatore di buio era molto piccola a causa dell'interferenza distruttiva (l'equivalente delle frange scure nell'esperimento delle due fenditure).

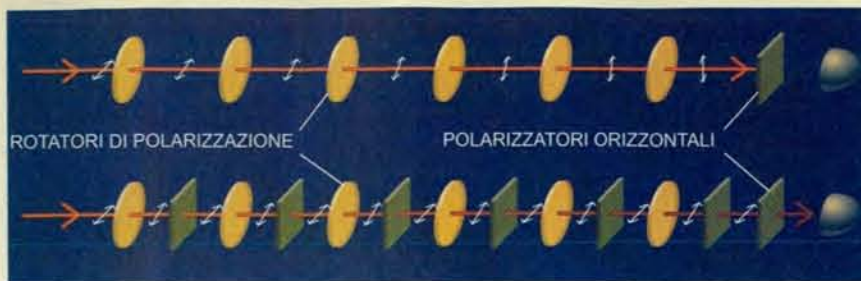
Ma, frapponendo un «sassolino» su uno dei due cammini, le circostanze cambiavano. L'ostacolo era in questo caso un piccolo specchio che dirigeva la luce a un altro rivelatore (che chiameremo «rivelatore di ostacolo»). In questa situazione, abbiamo visto che il rivelatore di ostacolo registrava l'arrivo di un fotone circa la metà delle volte, mentre il rivelatore di buio ne registrava uno all'incirca in un quarto dei casi (nel tempo rimanente il fotone lasciava l'interferometro lungo la medesima traiettoria di ingresso, senza dare alcuna informazione). L'arrivo di un fotone nel rivelatore di buio corrispondeva a individuare la presenza del nostro sassolino senza interazione con esso.

In una semplice estensione di questo procedimento, abbiamo ridotto la riflettività del divisore di fascio, diminuendo così la probabilità che i fotoni fossero riflessi nella direzione contenente lo specchio che li inviava al rivelatore di ostacolo. Ciò che abbiamo trovato, in accordo con le previsioni teoriche, è che la probabilità dei fotoni di arrivare in ciascuno dei due rivelatori diveniva circa uguale. Dunque, usando un divisore di fascio a scarsa riflettività, anche metà delle misurazioni compiute secondo la proposta di Elitzur-Vaidman può essere eseguita senza interazione (i casi in cui i fotoni lasciano l'interferometro nella medesima direzione in cui sono entrati non sono considerati misurazioni).

Nasce immediatamente una domanda: il 50 per cento è il miglior risultato che possiamo ottenere? Abbiamo discusso animatamente il problema poiché non sembrava che fosse possibile modificare l'apparato sperimentale in modo da rendere più elevata tale probabilità. Nel gennaio 1994, però, Mark A. Kasevich della Stanford University venne in visita a Innsbruck per un mese, e durante la sua permanenza trovò una soluzione che, se messa in pratica, avrebbe reso possibile la rivelazione di un oggetto senza interazione in quasi tutti i tentativi. Non era il primo esempio, e speriamo non sia nemmeno l'ultimo, in cui l'ottimismo quantistico riusciva ad avere la meglio sul pessimismo quantistico.

La nuova tecnica è più o meno l'applicazione di un altro strano fenomeno quantistico, discusso per la prima volta nei dettagli nel 1977 da Baidyanath Misra, ora all'Università di Bruxelles, e da E. C. George Sudarshan dell'Università del Texas ad Austin. Sostanzialmente, un sistema quantico può essere «intrappolato» nel suo stato iniziale a dispetto della sua tendenza spontanea a evolvere verso un altro stato. La possibilità deriva dall'insolito effetto che le misurazioni possono avere su un sistema quantistico. Questo fenomeno è chiamato «effetto Zenone quantistico», perché ricorda il famoso paradosso ideato dal filosofo greco Zenone, il quale negò che una freccia in volo possa muoversi perché essa appare «congelata» a ogni istante della sua traiettoria. È anche noto come effetto del «sorvegliare la pentola»: sappiamo tutti che il semplice atto di guardare una pentola non dovrebbe (e di fatto non ha) alcun effetto sul tempo che l'acqua impiega a bollire; in meccanica quantistica però questo effetto esiste: la misurazione influenza il risultato (questo principio si definisce postulato di proiezione).

Jared Schneidman Design

Per realizzare l'esperimento di Elitzur-Vaidman si usa luce proveniente da un cristallo convertitore, che entra in un divisore di fascio, rimbalza fra due specchi e torna nel divisore di fascio interferendo con se stessa (*in alto*). La luce non raggiunge il rivelatore di buio (che corrisponde a interferenza distruttiva; l'interferenza costruttiva si ottiene nella direzione da cui proviene inizialmente il fotone). Se uno specchio viene frapposto su uno dei cammini, non si verifica più interferenza al divisore di fascio, e il rivelatore di buio rivela talvolta dei fotoni (*qui sopra*).

La polarizzazione corrisponde alle oscillazioni delle onde luminose durante la loro propagazione nello spazio.

Jared Schneidman Design

L'effetto Zenone quantistico si può realizzare con dispositivi che ruotano la polarizzazione di 15 gradi. Dopo aver attraversato sei di questi dispositivi, il fotone cambia il suo stato di polarizzazione da orizzontale a verticale e viene dunque assorbito dal polarizzatore (*riga superiore*). Viceversa, interporre un polarizzatore dopo ogni dispositivo di rotazione impedisce alla polarizzazione di variare (*riga inferiore*).

La realizzazione sperimentale dell'effetto Zenone quantistico è stata ottenuta facendo percorrere al fotone una traiettoria a spirale, in modo che attraversi sei volte il rotatore di polarizzazione. Inserendo un polarizzatore vicino al rotatore si sopprime la rotazione della polarizzazione del fotone.

Kasevich ha essenzialmente reinventato l'esempio più semplice di questo effetto, che fu escogitato per la prima volta nel 1980 da Asher Peres del Technion-Israel Institute of Technology. L'esempio sfrutta un'ulteriore caratteristica della luce: la polarizzazione, ossia la direzione di oscillazione delle onde luminose (dall'alto verso il basso per le onde polarizzate verticalmente, e da sinistra a destra o viceversa per le onde polarizzate orizzontalmente). Queste oscillazioni sono perpendicolari alla direzione di propagazione della luce. In generale, la luce che proviene dal Sole e dalla maggior parte delle altre sorgenti luminose oscilla in tutte le direzioni - essendo una sovrapposizione di polarizzazioni - ma nel nostro caso ci occuperemo solo delle polarizzazioni verticale e orizzontale.

Consideriamo un fotone che si propaga attraverso una serie di, diciamo, sei dispositivi, ognuno dei quali fa ruotare leggermente la polarizzazione della luce, di modo che un fotone che all'inizio era polarizzato orizzontalmente finisca per essere polarizzato verticalmente. Questi dispositivi possono essere realizzati, per esempio, con celle di vetro contenenti acqua zuccherata. Al termine del suo percorso, il fotone giunge in un polarizzatore (uno strumento che trasmette i fotoni aventi una determinata polarizzazione, ma assorbe quelli con polarizzazione ortogonale alla prima). In questo esperimento ideale il polarizzatore trasmette a un rivelatore solo i fotoni con polarizzazione orizzontale.

Iniziamo con un fotone polarizzato orizzontalmente: ogni dispositivo ruota la sua polarizzazione di 15 gradi. È evidente che il fotone non giungerà mai al rivelatore: infatti, dopo essere passato attraverso tutte le celle, la sua polarizzazione sarà stata ruotata di 90 gradi (15 per ognuno dei sei dispositivi) diventando verticale. Il polarizzatore assorbe il fotone. Questa rotazione «a gradini» della polarizzazione è l'evoluzione quantistica che vogliamo impedire.

Per ottenere lo scopo desiderato, basta alternare un polarizzatore orizzontale a ogni rotatore di polarizzazione. Il motivo è che, dopo il primo dispositivo, la polarizzazione della luce non è stata considerevolmente ruotata dal piano orizzontale. Ciò significa che la probabilità che il fotone sia assorbito nel primo polarizzatore orizzontale è piuttosto piccola, solo del 6,7 per cento. (In termini matematici, il valore si ottiene elevando al quadrato il seno dell'angolo di rotazione.)

Se il fotone non è stato assorbito nel primo polarizzatore, si trova di nuovo in uno stato di polarizzazione orizzontale; deve essere così, perché questo è l'unico stato possibile per la luce che riesce ad attraversare un polarizzatore orizzontale. Al secondo rotatore, la polarizzazione viene di nuovo ruotata di 15 gradi dal piano orizzontale, e al secondo polarizzatore ha la medesima piccola probabilità di essere assorbita; se ciò non accade, continua a trasmettersi in uno stato di polarizzazione orizzontale. Il processo si ripete finché il fotone arriva all'ultimo polarizzatore.

Un fotone incidente ha una probabilità pari a due terzi di essere trasmesso attraverso tutti e sei i polarizzatori e di arrivare fino al rivelatore; la probabilità si ottiene dalla relazione $(\cos^2 15)^6$. Se aumentiamo il numero di passi del processo, diminuendo di conseguenza l'angolo di rotazione della polarizzazione a ogni passo (che sarà 90 diviso il numero di passi), la probabilità di trasmettere il fotone aumenta. Per 20 passi, la probabilità che il fotone raggiunga il rivelatore è circa del 90 per cento. Se si potesse costruire un sistema con 2500 passi, la probabilità che il fotone venga assorbito in uno dei polarizzatori sarebbe solo di uno su 1000. E se fosse possibile realizzare un numero infinito di passi, il fotone riuscirebbe a passare sempre. In questo modo abbiamo completamente annullato l'evoluzione della rotazione.

Per realizzare in pratica l'effetto Zenone quantistico abbiamo usato lo stesso cristallo non lineare dell'esempio precedente per ottenere un singolo fotone. Invece di impiegare sei rotatori e sei polarizzatori, abbiamo utilizzato una sola delle coppie, ma abbiamo costretto il fotone ad attraversare lo strumento sei volte, utilizzando tre specchi come se fossero una specie di scala a chiocciola. In assenza di polarizzatore, il fotone che esce dalla scala si trova sempre in uno stato di polarizzazione verticale. Inserendo il polarizzatore, abbiamo visto che il fotone era polarizzato orizzontalmente (a meno che non fosse assorbito dal polarizzatore stesso). Nel nostro esperimento a sei cicli questi casi si verificavano circa due terzi delle volte, come ci aspettavamo dall'analisi dell'esperimento concettuale.

Poi ci siamo proposti di effettuare una misurazione senza interazione - ovvero di rivelare la presenza di un oggetto opaco senza che alcun fotone lo colpisse - con un metodo ad alta efficienza. Il sistema da noi ideato era in un certo senso un ibrido fra l'effetto Zenone e il metodo di Elitzur-Vaidman. Un fotone polarizzato orizzontalmente entra nell'apparecchio e compie alcuni cicli (per esempio sei) prima di uscirne. (A questo scopo occorre uno specchio che possa essere «acceso» e «spento» molto frequentemente; per fortuna specchi simili, che di fatto sono dispositivi commutabili per interferenza, sono già stati costruiti per i laser a impulsi.) A un'estremità del sistema c'è un rotatore di polarizzazione, che fa ruotare la polarizzazione del fotone di 15 gradi a ogni ciclo; all'altro estremo è posto un interferometro di polarizzazione, consistente in un divisore di fascio polarizzante e in due traiettorie interferometriche di uguale lunghezza munite di specchi agli estremi.

In corrispondenza del divisore di fascio, la luce polarizzata orizzontalmente è trasmessa e quella polarizzata verticalmente è riflessa; in sostanza le due possibilità di trasmissione e riflessione sono analoghe ai percorsi nell'esperimento delle due fenditure. In assenza di un oggetto nell'interferometro, la luce si separa al divisore di fascio in base alla sua polarizzazione, si riflette sugli specchi di ciascuna traiettoria e si ricombina nel divisore di fascio. Come risultato, il fotone si ritrova esattamente nel medesimo stato che aveva prima di entrare nell'interferometro (ovvero con una polarizzazione ruotata di 15 gradi verso la verticale). Dunque, dopo sei cicli, la polarizzazione risulta verticale.

La situazione cambia quando un oggetto opaco viene interposto sul cammino della polarizzazione verticale dell'interferometro. Questa situazione è equivalente ad aver inserito i sei polarizzatori nell'esperimento dell'effetto Zenone quantistico. Così, nel primo ciclo, la probabilità che il fotone - la cui polarizzazione è stata ruotata solo di 15 gradi rispetto al piano orizzontale - entri nel percorso della polarizzazione verticale (e sia dunque assorbito dall'oggetto) è molto piccola (6,7 per cento, come nell'esperimento ideale di Zenone). Se questo assorbimento non si verifica, il fotone deve invece essere entrato nel cammino della polarizzazione orizzontale, e dunque la sua polarizzazione torna a essere puramente orizzontale.

Proprio come nell'effetto Zenone, l'intero processo si ripete a ogni ciclo, fino a che, dopo sei cicli, lo specchio inferiore viene spento e il fotone lascia il sistema. Misurando la polarizzazione del fotone, la troveremo ancora orizzontale, il che significa che ci deve essere un ostacolo all'interno dell'interferometro: altrimenti il fotone sarebbe uscito dal sistema con polarizzazione verticale. Utilizzando molti più cicli, possiamo rendere piccola a piacere la probabilità che il fotone sia assorbito. Risultati preliminari di nuovi esperimenti al Los Alamos National Laboratory hanno dimostrato che fino al 70 per cento delle misurazioni può essere privo di interazione. Noi speriamo di riuscire presto a portare questo valore all'85 per cento.

A che cosa servono tutti questi giochi di prestigio quantistici? Ci sembra che la situazione assomigli a quella dei primi anni dopo l'invenzione del laser, quando gli scienziati sapevano che esso si sarebbe rivelato la soluzione di molti problemi non ancora posti. La misurazione senza interazione potrebbe essere usata, per esempio, come un metodo fotografico piuttosto insolito, con cui ottenere l'immagine di un oggetto senza esporlo alla luce.

Il processo di «fotografia» funzionerebbe nel modo seguente: invece di utilizzare un solo fotone, ne impiegheremmo uno per pixel, e con essi eseguiremmo misurazioni senza interazione. In quelle regioni dove l'oggetto non blocca il cammino della luce nell'interferometro, la polarizzazione orizzontale dei fotoni subirebbe la prevista rotazione «a gradino» in direzione verticale. Viceversa, nelle regioni dove l'oggetto blocca il percorso della luce, alcuni dei fotoni sarebbero assorbiti; i rimanenti avrebbero uno stato di polarizzazione orizzontale. Infine otterremmo una fotografia dei fotoni mediante un filtro polarizzante, dopo che essi avessero eseguito il numero di cicli richiesto.

Se il filtro fosse allineato orizzontalmente, ricaveremmo un'immagine dell'oggetto; se fosse allineato verticalmente, otterremmo il negativo. In entrambi i casi, la fotografia è fatta da fotoni che non hanno mai toccato l'oggetto. Queste tecniche possono funzionare

Misurazioni efficienti senza interazione si possono ottenere combinando le apparecchiature utilizzate per dimostrare l'effetto Zenone quantistico e l'ipotesi di Elitzur-Vaidman. Il fotone entra nello specchio commutabile dal lato inferiore e percorre per sei volte i cammini ottici prima di poter uscire attraverso il medesimo specchio. La sua polarizzazione finale sarà ancora orizzontale se c'è un ostacolo lungo uno dei cammini; altrimenti, sarà stata ruotata fino a diventare verticale.

Il postulato di proiezione

Il postulato asserisce che la misurazione di un sistema quantistico può dare solo determinate risposte. Inoltre, dopo la misurazione, il sistema quantistico rimane in uno stato determinato dal risultato ottenuto. Così, un fotone che attraversa un polarizzatore orizzontale è per forza di cose polarizzato orizzontalmente, anche se era inizialmente polarizzato quasi in verticale (il polarizzatore elimina la componente verticale della polarizzazione). La probabilità di trasmissione in questo caso sarebbe tuttavia bassa.

Jared Schneidman Design

Le tecniche senza interazione si prestano anche a eseguire «fotografie». In questo modo l'oggetto - una Medusa che non deve essere osservata direttamente - assorbirà pochissimi fotoni.

anche con un oggetto semitrasparente, e forse potranno essere generalizzate allo scopo di determinare il colore di un oggetto (questi sarebbero però risultati più difficili da ottenere).

È concepibile che, con qualche variazione, questo metodo di formazione delle immagini si dimostri un giorno utile in medicina, per esempio come mezzo per visualizzare le cellule viventi. Si potrebbe immaginare di effettuare un esame ai raggi X senza esporre l'individuo ad alte dosi di radiazione penetrante: un metodo simile comporterebbe perciò meno rischi per i pazienti delle radiografie standard. (In pratica però è improbabile che si riescano a ottenere «fotografie» a raggi X, data la difficoltà di realizzare componenti ottici che funzionino a queste lunghezze d'onda.)

Una possibile applicazione più immediata del metodo è la visualizzazione degli aggregati di atomi ultrafreddi recentemente prodotti in diversi laboratori, in alcuni dei quali è stata rilevata condensazione di Bose-Einstein (un nuovo stato quantico in cui molti atomi si comportano collettivamente come un'unica entità). In tali aggregati ogni atomo è così freddo che un singolo fotone può bastare a espellerlo. All'inizio non esisteva un metodo per ottenere un'immagine dello stato condensato senza distruggere l'aggregato; i metodi di misurazione senza interazione potrebbero però costituire un mezzo per avere un'immagine di tali insiemi di atomi.

Oltre a fornire immagini di oggetti quantistici, i metodi di misurazione senza interazione potrebbero anche crearne alcuni; in particolare si potrebbero estendere alla creazione del «gatto di Schrödinger», un'entità teorica molto amata in meccanica quantistica. Il felino quantico è costruito in modo da poter esistere simultaneamente in due stati: sia vivo sia morto (una sovrapposizione di stati). All'inizio del 1996, ricercatori del National Institute of Standards and Technology sono riusciti a creare un tipo preliminare di gatto di Schrödinger - un «gattino» - con uno ione berillio. Essi hanno utilizzato una combinazione di laser e di campi elettromagnetici per rendere possibile l'esistenza simultanea dello ione in due punti dello spazio distanti 83 nanometri, una distanza notevole a scala quantistica.

Se tale ione dovesse venire esaminato senza interazione, anche il fotone sonda verrebbe messo in una sovrapposizione di due stati: potrebbe ritrovarsi polarizzato orizzontalmente e verticalmente al medesimo tempo. L'apparecchiatura che abbiamo descritto dovrebbe anzi essere capace di collocare un gruppo di 20 fotoni, per esempio, nel medesimo stato di polarizzazione. Ogni fotone «saprebbe» di avere la medesima polarizzazione di tutti gli altri, ma nessuno conoscerebbe la propria, e tutti rimarrebbero in questa sovrapposizione finché una misurazione non «rivelasse loro» di essere polarizzati orizzontalmente o verticalmente. Questo consistente gruppetto di fotoni così vincolati dimostrerebbe che effetti quantistici si possono manifestare anche a scala relativamente grande.

Situato al di là dei limiti dell'esperienza quotidiana, il concetto di misurazioni senza interazione sembra misterioso, se non addirittura privo di senso. Forse apparirebbe meno bizzarro se ci si ricordasse che la meccanica quantistica opera nel campo delle possibilità. È proprio perché *avrebbe potuto* esserci un'interazione che siamo in grado di impedirne la realizzazione.

Se ciò non vi è di aiuto, potete consolarvi col fatto che, nel corso degli anni, persino i fisici si sono spesso trovati in difficoltà con le stranezze del mondo quantistico. Le ragioni che stanno dietro questi sortilegi quantistici - la complementarità, il duplice aspetto di onda e di particella della luce e la natura delle misurazioni quantistiche - sono conosciute dal 1930. Solo recentemente però i fisici hanno iniziato ad applicare queste idee per svelare nuovi fenomeni nell'elaborazione quantistica delle informazioni, inclusa la capacità di vedere nel buio.

PAUL KWIAT, HARALD WEINFURTER e ANTON ZEILINGER hanno collaborato, nello studio delle misurazioni senza interazione, presso l'Università di Innsbruck. Kwiat, laureatosi all'Università della California a Berkeley, lavora al Los Alamos National Laboratory. Weinfurter, che ha conseguito la laurea al Politecnico di Vienna, è stato ricercatore presso l'Istituto Hahn-Meitner di Berlino ed ora è all'Accademia delle scienze austriaca. A sua volta membro della medesima Accademia, Zeilinger ha conseguito la laurea presso l'Università di Vienna e ha effettuato attività di ricerca presso numerosi istituti in ogni parte del mondo.

FEYNMAN RICHARD P., *QED: The Strange Theory of Light and Matter*, Princeton University Press, 1985.

ELITZUR AVSHALOM C. e VAIDMAN LEV, *Quantum Mechanical Interaction-Free Measurements* in «Foundations of Physics», 23, n. 7, luglio 1993.

KWIAT P. G., WEINFURTER H., HERZOG T., ZEILINGER A. e KASEVICH M. A., *Interaction-Free Measurement* in «Physical Review Letters», 74, n. 24, 12 giugno 1995.

Discussioni sull'argomento si possono trovare su Internet agli indirizzi: http://info.uibk.ac.at/c/c7/c704/qo/photon/#Inter e http://p23.lanl.gov/Quantum//kwiat/ifm-folder/ifmtext.htm

L'importanza dell'imperfezione nelle gemme

Minuscole intrusioni e difetti nella crescita dei cristalli, formatisi nelle profondità della Terra nell'arco di milioni di anni, conferiscono alle gemme un fascino che va oltre il loro valore pecuniario

Testo e fotografie di Willy Andergassen

«La *Nona* di Beethoven è perfetta.» «La Cappella sistina è perfetta.» Nel linguaggio comune persino un pallonetto di Del Piero o il fisico di Naomi Campbell - o di Michael Jordan, secondo i gusti - diventano «perfetti». Non di rado questo prezioso attributo è affibbiato a una scultura, a una macchina o, per entrare in argomento, a una gemma.

In realtà, il giudizio viene espresso dai nostri sensi, che sono purtroppo limitati, oppure viene influenzato dall'opinione di altri che a loro volta reputano una certa cosa «perfetta». Una parte di colpa, a dire il vero, si può attribuire anche alla carenza del nostro linguaggio, che qualche volta ci fa usare la stessa parola un po' a sproposito, o perlomeno in senso non proprio letterale.

La perfezione, in natura, non esiste, almeno a quanto ne sappiamo: la materia si trasforma, muta, evolve, nasce, muore e rinasce continuamente. Forse, anzi, è proprio l'imperfezione la chiave di tutto: una leggera vibrazione, una singolarità, ha permesso non solo l'evento del big bang, ma l'intera formazione dell'universo e l'evolversi di innumerevoli forme per arrivare all'intelletto dell'uomo. Le piccole e grandi imperfezioni, mutazioni, ci hanno portati al punto nel quale ci troviamo; forse nei piccoli difetti o imperfezioni del DNA, e nella replica di questi, sta l'enorme diversificazione della vita sul nostro pianeta e forse anche altrove.

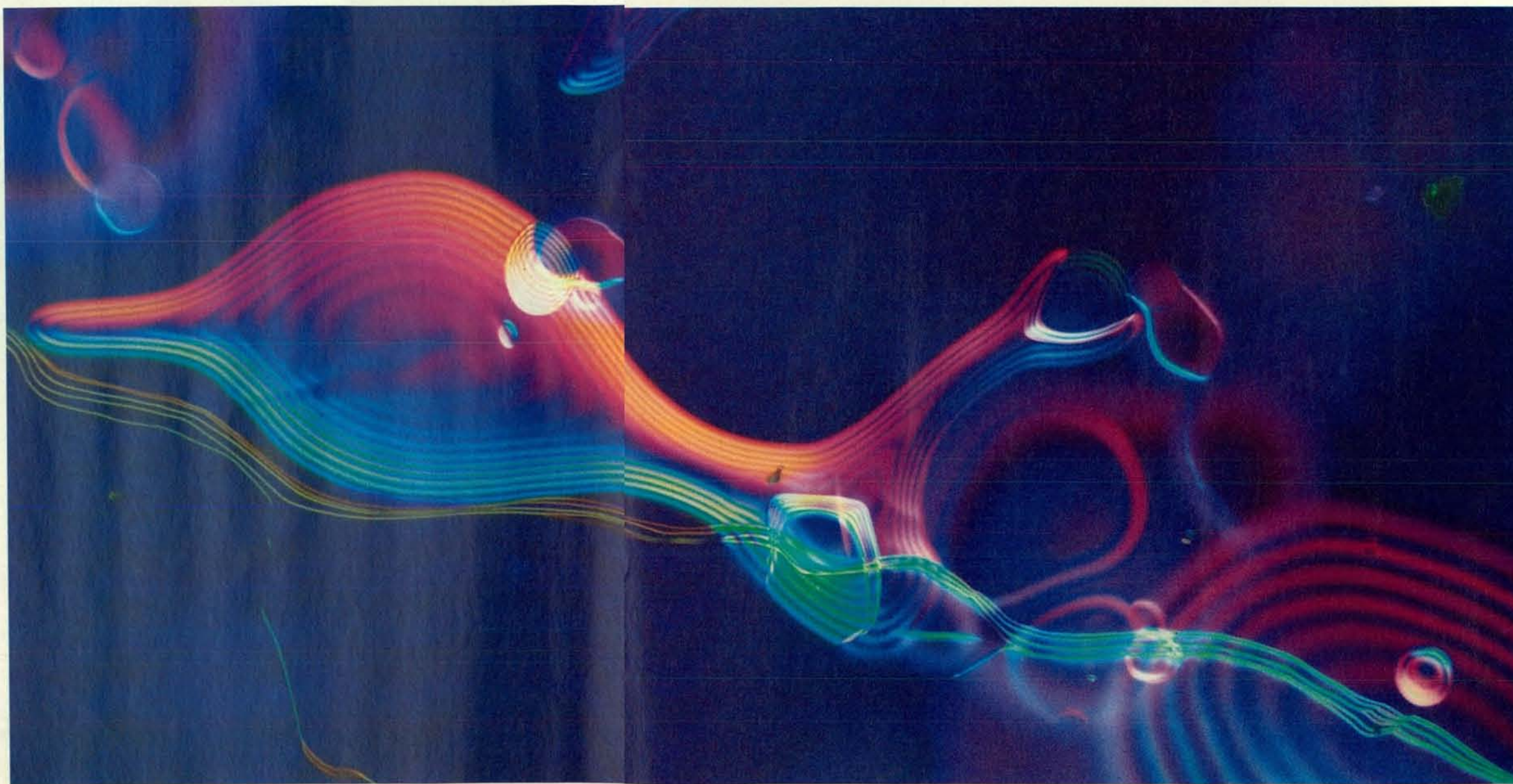
Se questo è vero, possiamo chiederci: avrebbero le gemme, senza imperfezioni, i colori che tanto ammiriamo? O meglio: esiste una gemma perfetta? Si può tranquillamente rispondere: no, non esiste. Piuttosto, esistono gemme con difetti minori.

Per la loro forma e composizione chimica possiamo distinguere una stella da un pianeta, un diamante da un rubino, e possiamo constatare, ad esempio, che un certo rubino proviene dalla miniera di Mogok nel Myanmar (ex Birmania), dato che nel suo interno è possibile leggere la sua genesi proprio grazie a singole imperfezioni: i difetti nella costruzione del suo reticolo cristallino, o la presenza di ospiti quali piccoli cristalli di altra natura, o anche ferite, fessure provocate da eventi tellurici, cristalli negativi, ovvero cavità contenenti liquidi e bolle di gas. Questi e altri ancora sono tutti fattori diagnostici che determinano la provenienza di una gemma. Anche se estratte dalla stessa miniera, non esistono due gemme perfettamente identiche; ognuna è un esemplare unico, con un'impronta digitale sua propria.

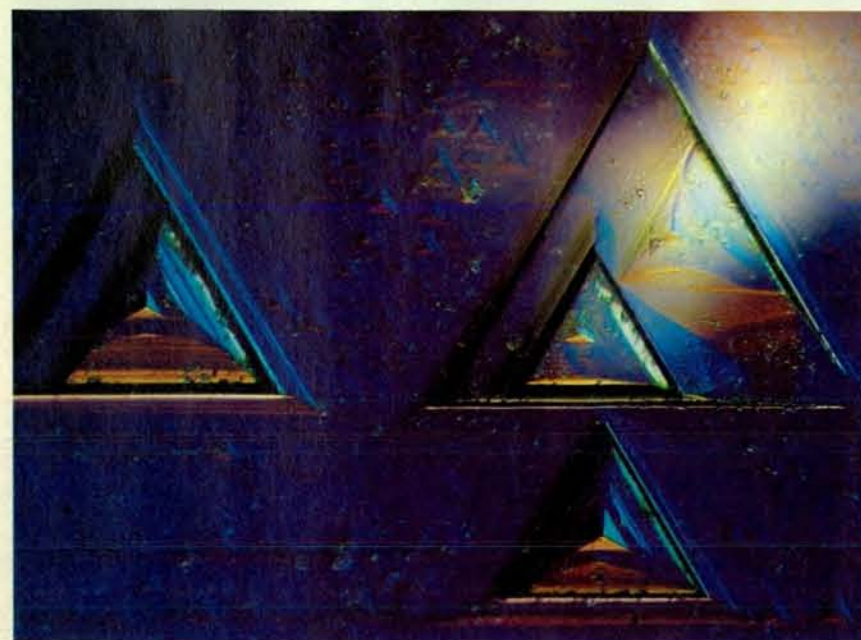
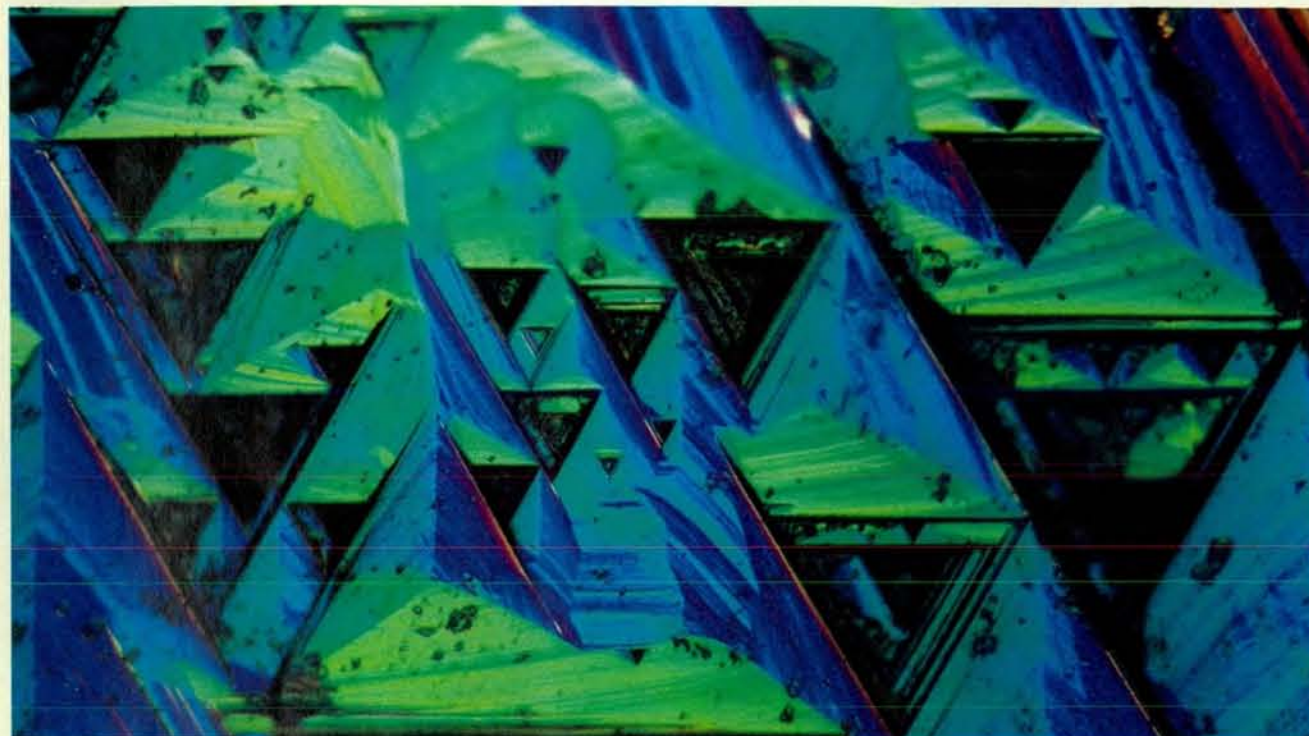
Un diamante dichiarato «puro» è solo una convenzione, essendo la purezza stabilita in base a quanto visibile a 10 ingrandimenti, osservato con il lentino o al microscopio; a ingrandimenti superiori, ad esempio 25, 30 o 100, le impurità diventano visibili, trascurando le imperfezioni non rilevabili al microscopio, come atomi mancanti nella sequenza del reticolo, oppure intere zone del cristallo distorte o sotto stress.

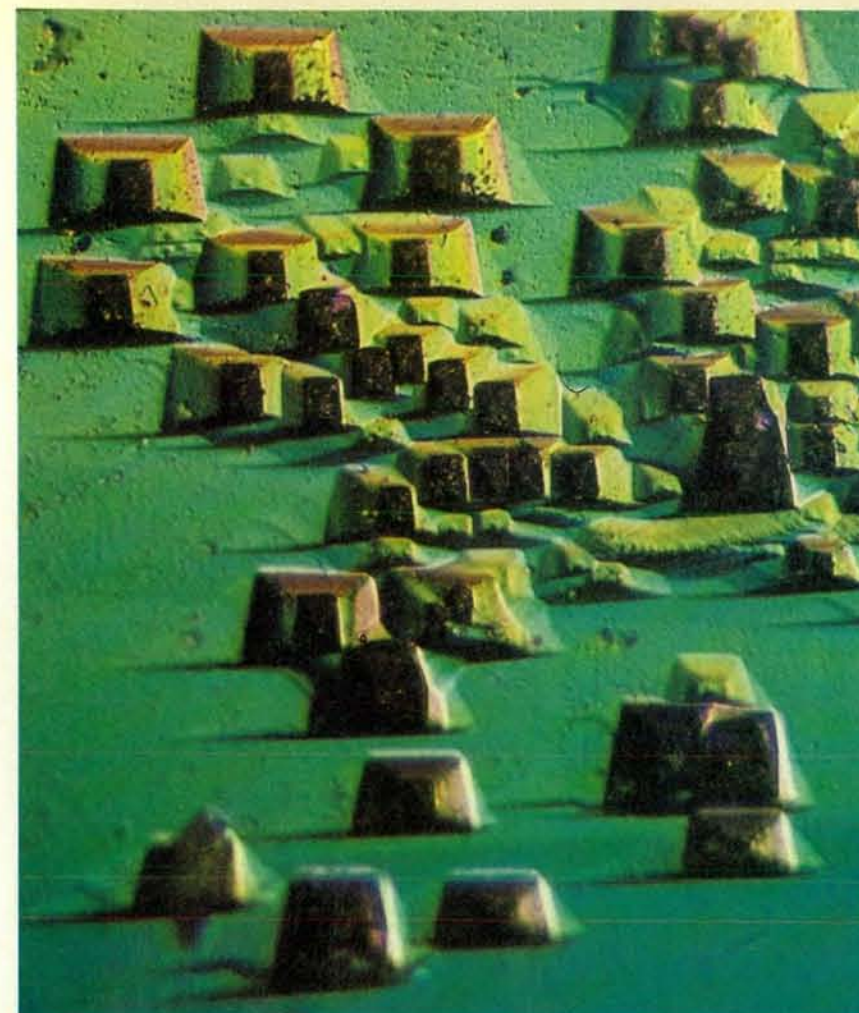
Chimicamente il diamante è carbonio puro; nel suo reticolo gli atomi sono ordinati in modo che ognuno di essi risulta al centro di un tetraedro ai cui vertici sono posti gli atomi contigui. La cella elementare del reticolo è cubica a facce centrate e la distanza interatomica è di soli 0,1542 nanometri.

Il legame covalente, insieme con un raggio tanto piccolo e la disposizione cubica, fa del diamante il materiale più duro che si conosca. Malgrado l'impaccamento così fitto, gli atomi di carbonio occupano solo il 36 per cento dello spazio disponibile: il resto dell'edificio è vuoto, ma non del tutto, nel senso che in questi spazi si annidano inquilini «indesiderati». Sono stati individuati fino a oggi 13 elementi diversi, non tutti necessariamente presenti in una singola gemma. Quanto al colore, nel dia-

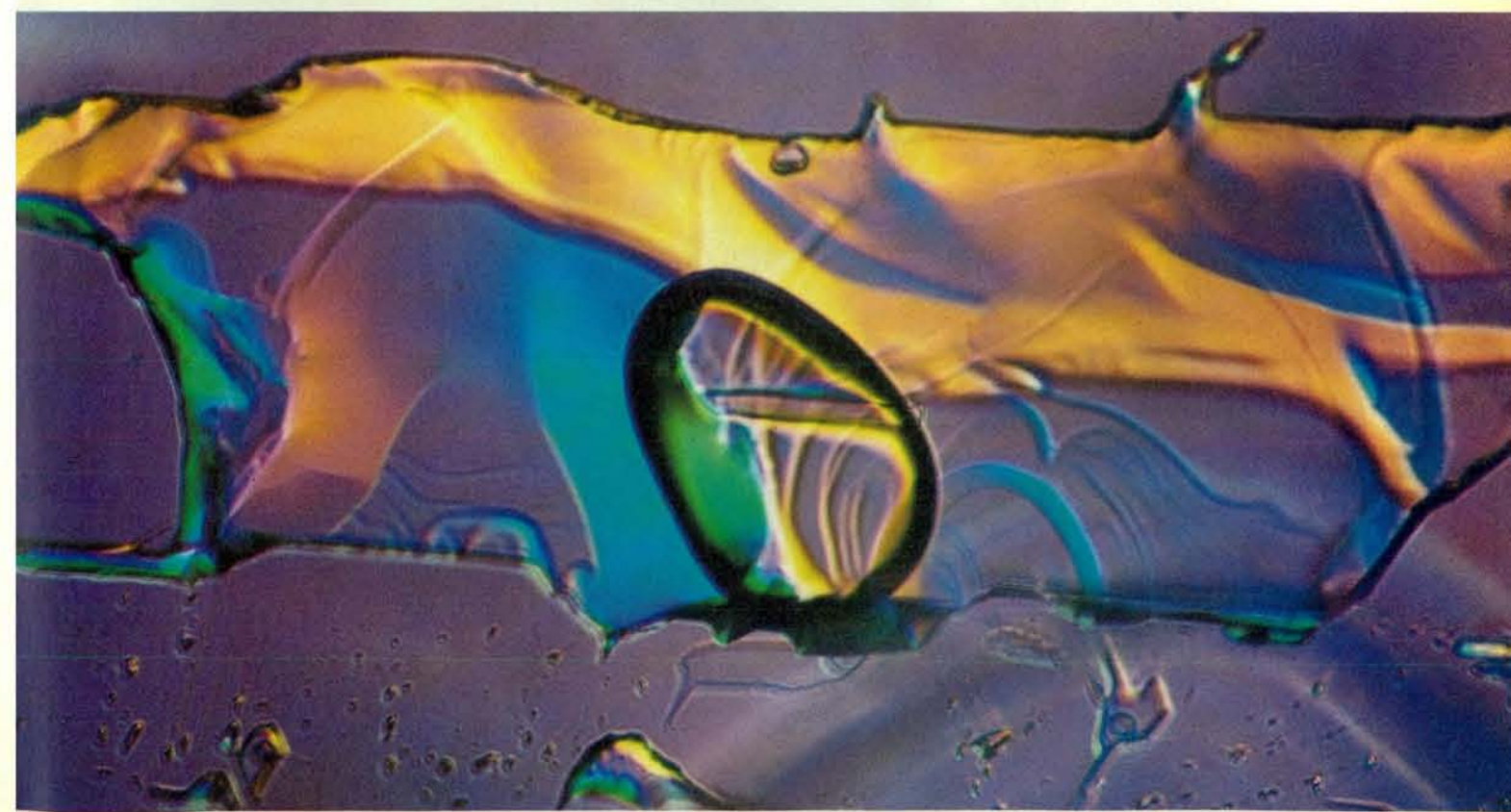
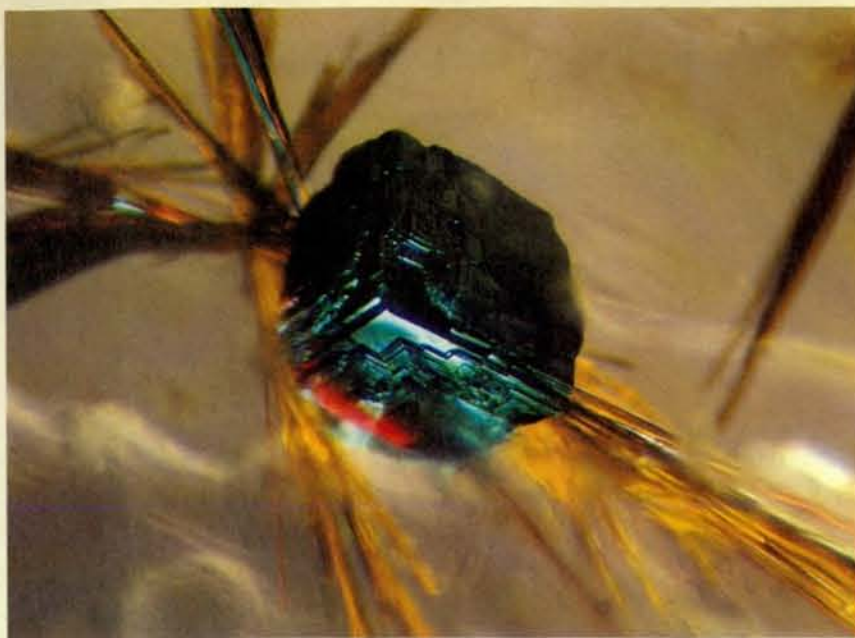
Mica biotite. La mica si trova inclusa, in forma di piccoli cristalli, in molte gemme. L'immagine rappresenta perciò inclusioni nell'inclusione. Le forme tondeggianti sono provocate in genere, per un fenomeno detto «effetto Fraunhofer», da microcristalli di zircone.

mante hanno un ruolo importante i cosiddetti «centri di colore»: difetti del reticolo che provocano un assorbimento selettivo della luce che vi penetra. I centri di colore assorbono alcune lunghezze d'onda, o colori dello spettro, trasformandoli nel colore che noi vediamo. Gran parte dei diamanti sono incolori, o con leggere tonalità di giallo; in rari casi possono assumere colore rosa, rosso, giallo, verde, blu, viola e anche nero opaco. Essendo questi colori rari, e perciò molto apprezzati, non manca la contraffazione, dato che esistono vari metodi per indurre il colore artificialmente.

Il diamante è il miglior isolante elettrico conosciuto, salvo quello blu che è semiconduttore a causa di tracce di boro al suo interno. È anche il miglior conduttore termico, essendo in grado di misurare intervalli di un cinquecentesimo di grado. Essendo carbonio puro, il diamante non fonde, ma è combustibile, e già a una temperatura di 850 gradi Celsius si consuma totalmente, trasformandosi in un mucchietto di cenere. La luce, nell'aria (in prima approssimazione), ha una velocità di 300 000 chilometri al secondo, e penetrando in un solido viene rallentata in rapporto alla struttura del mezzo; nel diamante la velocità della luce si riduce a circa la metà. Queste e altre proprietà del diamante vengono ampiamente sfruttate nei processi industriali.

A quanto pare, il cristallo è la prima materia macroscopica ordinata in natura e può rimanere stabile per miliardi di anni. Tutti i cristalli si sono formati, e continuano a formarsi, in particolari condizioni di calore e di pressione, che inducono singoli atomi di uno o più dei circa 100 elementi conosciuti ad aggregarsi e, per nucleazione spontanea, formare una prima cella base, la quale poi si replica miliardi di volte per formare un edificio, di volta in volta diverso. A seconda degli elementi coinvolti, e seguendo leggi cristallografiche ben precise, il cristallo continua a crescere fin quando le condizioni ambientali lo permettono.

Queste fotografie illustrano la morfologia esterna di diamanti grezzi. Le immagini sono state ottenute mediante la tecnica a contrasto di fase a 150 ingrandimenti.

Il diamante, per potersi formare, ha esigenze del tutto particolari. Necessita di una pressione di 40-50 000 atmosfere e di una temperatura di oltre 1000 gradi. Queste condizioni estreme si verificano nel mantello terrestre, circa 100 chilometri al di sotto della superficie. I diamanti che si trovano in superficie vi sono stati portati in seguito a esplosioni vulcaniche avvenute tra 130 milioni e un miliardo di anni fa.

Il diamante, probabilmente, si forma anche oggi, ma non può più raggiungere la superficie; la crosta terrestre si è ispessita a tal punto che il magma di profondità non riesce più a emergere: i vulcani odierni sono infatti alimentati da sacche magmatiche poco profonde, che non contengono mai diamanti. L'estrazione dei diamanti avviene nei cosiddetti «camini kimberlitici», condotti vulcanici che hanno forma di cono rovesciato con diametro da poche decine di metri fino a 1,5 chilometri. Le miniere raggiungono al massimo 2 chilometri di profondità.

Ci sono poi i giacimenti secondari. Per erosione dei terreni da parte di agenti atmosferici, i fiumi esistenti in antichità hanno trasportato i diamanti anche a centinaia di chilometri di distanza dai luoghi d'origine, e questi vengono recuperati lungo gli alvei fluviali, o persino in mare a poca distanza dalla costa.

A sinistra, un topazio del Messico, la cui morfologia esterna è dovuta a corrosione naturale. L'immagine è stata ottenuta in luce polarizzata a 400 ingrandimenti. Qui sotto, un topazio del Brasile che presenta una cavità contenente un liquido e una bolla di gas. Immagine a contrasto di fase, realizzata a 200 ingrandimenti.

Un'ametista del Malawi ha incorporato un cristallo di ematite poggiato su un ciuffo di goethite aghiforme. Immagine ottenuta in luce polarizzata a 80 ingrandimenti.

Tutte le altre gemme si formano poche decine o centinaia di metri sotto la superficie terrestre, a una pressione di poche atmosfere e a una temperatura oscillante fra i 300 e i 600 gradi. Tali strutture si chiamano monocristalli, e sono in numero esiguo rispetto alle rocce comuni, le quali sono composte in gran parte da microcristalli che non hanno avuto né il tempo né lo spazio per svilupparsi, generando così una massa compatta disordinata. Altre rocce - come lave e ossidiane che sono vetri vulcanici - si sono raffreddate rapidamente, senza dare agli atomi il tempo di aggregarsi, cosicché questi sono rimasti sparsi, alla rinfusa, formando una massa amorfa.

Ma torniamo ai monocristalli e alle gemme. Alcune sostanze - come il quarzo, il topazio, il berillo - possono formare monocristalli che superano il metro di altezza e svariate tonnellate di peso, mentre il rubino, lo smeraldo e lo zaffiro si misurano in centimetri, o anche meno.

I cristalli, durante la loro formazione, hanno trovato raramente una continuità di condizioni ideali, a causa della dinamica crostale o di bruschi cambiamenti di temperatura o di pressione. Nella lunga permanenza nel sottosuolo possono aver subìto corrosioni parziali o totali. Possono essersi accresciuti a più riprese, anche a distanza di millenni. Hanno incorporato elementi estranei o microcristalli di altra specie già formati sul posto. Possono essersi fessurati o rotti, e in seguito rimarginati, magari solo parzialmente.

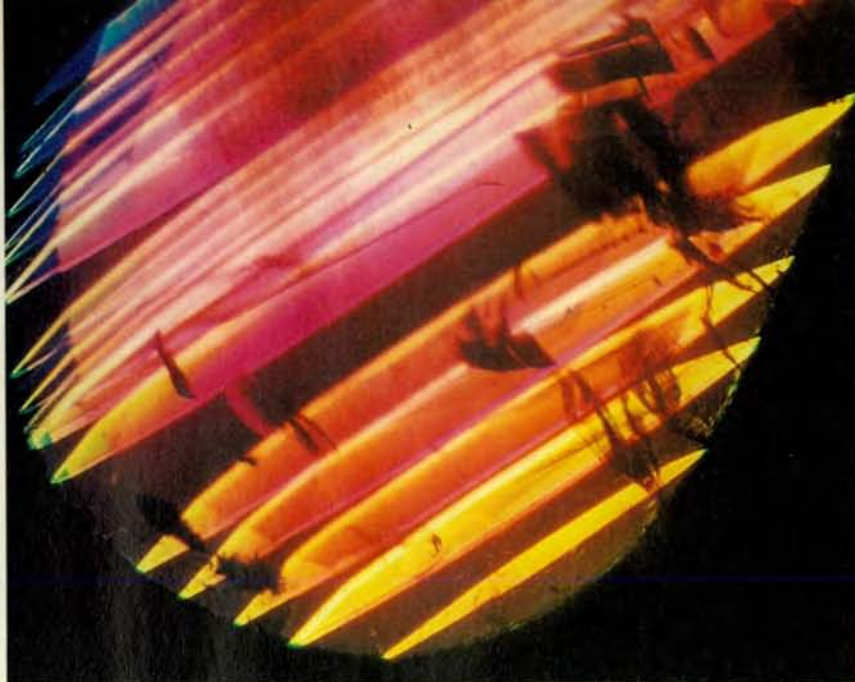
Finalmente arrivate nelle nostre mani, queste strutture meravigliose si rivelano piene di difetti e imperfezioni. Il tagliatore, nel sagomare e sfaccettare un cristallo per farlo diventare gemma, scarta le parti più compromesse e utilizza quelle più limpide e di colore apprezzabile. Gemme definite pure, ovvero nelle quali non risultino inclusioni visibili a occhio nudo o a pochi ingrandimenti, sono molto rare; ma anche queste non sono prive di difetti, ed è un bene che sia così, altrimenti avremmo gemme tutte uguali. Non ci sarebbero il rubino rosso, lo smeraldo verde, lo zaffiro blu. Il rubino e lo zaffiro appartengono alla stessa specie minerale, un ossido di alluminio che prende il nome di corindone. Se è puro, il che è piuttosto raro, è incolore; se invece contiene cromo, in genere non più dell'1 per cento, assume un colore rosso ed è chiamato rubino; se contiene ferro diventa blu, e abbiamo uno zaffiro.

Il colore delle gemme, dunque, è dovuto principalmente alle loro imperfezioni, e in particolare alla presenza al loro interno di elementi di transizione (titanio, vanadio, cromo, manganese, ferro, nichel, rame e così via) e di vari difetti nel reticolo cristallino: centri di colore che sono in realtà lacune elettroniche, atomi mancanti, difetti dovuti a una crescita disturbata o troppo veloce. Gli atomi non hanno avuto il tempo né la possibilità di posizionarsi nella sequenza corretta.

Certi elementi traccia sono cromofori, ovvero in grado di conferire il colore direttamente, ma più spesso il colore di una gemma è dovuto all'assorbimento selettivo della luce bianca, che sappiamo essere composta da lunghezze d'onda decrescenti dal rosso verso il viola (corrispondenti rispettivamente a circa 700 e 350 nanometri), ovvero dalle lunghezze d'onda della regione visibile dello spettro elettromagnetico. In altre parole, il colore dei corpi trasparenti è causato dalle onde luminose che essi trasmettono. In una gemma riusciamo a percepire solo quel colore la cui lunghezza d'onda «va d'accordo» con le distanze e le posizioni reciproche degli atomi, mentre le altre vengono assorbite.

Come nell'immagine alle pagine 72-73, la mica inclusa in una gemma presenta a sua volta degli «intrusi». In questo caso, in particolare, è suggestiva la scia di goccioline nella parte sinistra dell'immagine.

Lo zaffiro del Myanmar (ex Birmania), nella pagina a fronte, ha inglobato un cristallo di granato, in alto a sinistra; questo, per un trattamento termico, si è parzialmente fuso, riversando parte di sé nella fessura da esso stesso provocata, nella quale si è formata una figura geometrica multicolore (immagine in luce polarizzata a 160 ingrandimenti). Qui sopra, uno zaffiro dello Sri Lanka si è dilatato creando un alone di stress sempre a causa di un trattamento termico (luce trasmessa, 80 ingrandimenti).

La stessa imperfezione può avere effetti diversi in gemme di composizione differente, dal momento che la struttura del reticolo del cristallo cambia in funzione degli elementi coinvolti. Ad esempio, sia il rubino sia lo smeraldo devono il loro colore essenzialmente al cromo, eppure il rubino è rosso e lo smeraldo verde. La causa di questo fenomeno risiede nel fatto che il rubino è un corindone, un ossido di alluminio (Al_2O_3), mentre lo smeraldo è un berillo, di composizione chimica $Al_2Be_3(Si_6O_{18})$. L'ossido di cromo è presente in entrambe le gemme, in media con una concentrazione dello 0,1-0,3 per cento. Lo zaffiro, come detto, è anch'esso un corindone, e deve il suo

Questo rubino della miniera Mogok (Myanmar) presenta lamelle di plurigemmazione non visibili a occhio nudo (l'immagine è stata ripresa in luce polarizzata a 15 ingrandimenti), piccole fessure e zone con fini aghi di rutilo.

colore blu al ferro, presente allo 0,005-0,8 per cento, ma possono esserci anche tracce di altri elementi quali cromo, vanadio, titanio e così via. Nello zaffiro, come in diverse altre gemme, il colore può essere intensificato sottoponendo il cristallo a un trattamento termico, a 1600-1700 gradi: mantenendo questa temperatura per ore, o giorni, si ottiene sostanzialmente un cambio di valenza del ferro e un colore più intenso e limpido.

Il topazio ha formula chimica $Al_2(F, OH)_2SiO_4$, è molto popolare e si presenta in una vasta gamma di colori, il più diffuso dei quali è il blu. I cristalli, in natura, sono di un azzurro tenue, mentre le gemme in commercio sono quasi tutte di un colore blu intenso, ottenuto per irradiazione o bombardamento con particelle accelerate.

Il colore naturale è dovuto a irradiazione da parte di rocce radioattive che si trovano vicine al topazio. La lunga permanenza in questa condizione ha causato difetti nella struttura, i cosiddetti precursori dei centri di colore, i quali danno appunto il colore blu pallido. La saturazione del colore si può aumentare con procedimenti artificiali, usando essenzialmente due metodi: il primo consiste nella trasformazione di gran parte dei precursori in veri e propri centri di colore, irradiando le gemme con radiazione gamma o con elettroni accelerati. Questo metodo agisce sulla configurazione elettronica degli atomi, ma lascia il nucleo intatto non avendo sufficiente energia.

Per ottenere un colore ancora più intenso, si sottopone la gemma a un bombardamento con neutroni, di massa molto superiore rispetto a quella degli elettroni. Un fascio di neutroni accelerati ha energia sufficiente per danneggiare il nucleo degli atomi presenti nel topazio, generando così altri centri di colore. La saturazione del blu dipende dalla durata del trattamento, che può essere prolungato a volontà, ma può altresì provocare un effetto collaterale: esso trasforma gli elementi traccia presenti nel topazio in isotopi radioattivi. I radioisotopi appena formati hanno tempi di dimezzamento intorno ai 200 giorni, e i topazi trattati con questa tecnica, che sono la maggioranza, devono essere tenuti sotto chiave per circa quattro anni prima di essere immessi sul mercato, affinché vi sia la certezza che non possano provocare danni a coloro che li indossano.

Anche nel topazio, i centri di colore non sono colorati di per sé. Il colore è l'effetto dell'assorbimento selettivo della luce; i difetti presenti nel reticolo assorbono il rosso, l'arancione, il giallo, il verde, e trasmettono solo la banda blu dello spettro, dando origine alla colorazione che percepiamo.

Quanto esposto in questa sede a proposito del colore è solo una descrizione per sommi capi; in realtà il fenomeno è molto più complesso, e non soltanto nelle gemme. Nel caso del topazio, per esempio, possono essere presenti, nella concentrazione di qualche parte per milione, almeno altri 13 elementi diversi, e non è ancora del tutto chiaro come e quali di essi concorrano effettivamente alla formazione del colore.

Un'altra gemma piuttosto rara e molto apprezzata è l'alessandrite, una varietà del crisoberillo, trovata per la prima volta in Russia e così chiamata in onore dello zar Alessandro II. La caratteristica principale di questa pietra è il fatto che cambia colore: è verde alla luce del giorno e rossa alla luce artificiale. Questo singolare comportamento si spiega osservando lo spettro di assorbimento dell'alessandrite, che assorbe fortemente nelle regioni gialla e blu, trasmettendo solo il verde e il rosso. La luce del Sole presenta una forte prevalenza del verde rispetto al rosso, ed è per questo che la gemma di giorno appare verde. Al contrario, nella luce artificiale prevale il rosso rispetto al verde, e di conseguenza la pietra si mostra di colore rosso.

Riepilogando, si può intuire quanto siano importanti le cosiddette imperfezioni nell'edificio del cristallo. Nonostante ciò, quelle presenti in natura talvolta non bastano, e l'uomo arriva a far crescere i cristalli per sintesi in laboratorio, con l'aggiunta delle sostanze più svariate, nell'intento di ottenere risultati sempre diversi, reclamati a gran voce dall'industria e in particolar modo dai settori più avanzati.

Più romanticamente, le imperfezioni delle gemme ci assicurano di possedere degli esemplari unici e irripetibili.

WILLY ANDERGASSEN si è diplomato in gemmologia presso l'Istituto gemmologico tedesco e l'Università di Heidelberg. Docente per tre anni all'Istituto gemmologico italiano, ha collaborato alle analisi di reperti archeologici del Museo nazionale romano. Ha pubblicato libri e videocassette didattiche. Per «Le Scienze» ha contribuito nel 1994 alla realizzazione della videocassetta *Viaggio nelle gemme*. Dal 1975 si occupa di ricerca e analisi gemmologiche presso A. N. Minerali di Roma.

WEBSTER E., *Gems*, Butterworths, Londra, 1975.

FIELD J. E., *The Properties of Diamond*, Academic Press, Londra, 1979.

ANDERGASSEN W., *Il diamante oggi*, Bramante-Umbria, 1982.

NASSAU K., *Gemstone Enhancement*, Butterworths, Londra, 1984.

ANDERGASSEN W., *Caratteristiche interne delle gemme*, G. Bossi, Cavalese (TN), 1996.

I vantaggi dei veicoli elettrici

Gli ultimi progressi tecnici stanno rendendo conveniente la costruzione di automobili elettriche, ma l'abbandono dei motori a combustione interna potrebbe essere rallentato da ragioni politiche

di Daniel Sperling

Gli autoveicoli assorbono circa la metà del petrolio consumato negli Stati Uniti, producono circa la metà dell'inquinamento urbano e un quarto dei gas che provocano l'effetto serra. Negli altri paesi sviluppati e nelle grandi metropoli del Terzo Mondo le auto assorbono una quota più o meno analoga di risorse. Se nel prossimo decennio l'uso di autoveicoli continuerà a intensificarsi, gli Stati Uniti e altri paesi dovranno affrontare questo problema, altrimenti i costi economici, politici e sanitari diventeranno inaccettabili. È poco probabile che il prezzo del petrolio rimanga basso com'è oggi o che gli altri paesi siano disposti ad accettare il sempre più pesante contributo che gli Stati Uniti danno al cambiamento climatico del pianeta.

I politici e le industrie hanno quattro scelte possibili: ridurre l'uso degli autoveicoli; aumentare l'efficienza dei motori e ridurre le emissioni dei veicoli tradizionali a benzina; adottare carburanti meno dannosi; sfruttare sistemi di propulsione meno inquinanti. L'ultima di queste alternative (in particolare il ricorso a veicoli mossi dall'elettricità) è, alla lunga, l'unica scelta sostenibile. In teoria anche le altre alternative sono interessanti, ma in realtà o sono poco pratiche oppure offrono solo vantaggi marginali. Per esempio una contrazione dell'uso dei veicoli potrebbe ridurre i danni causati dalla congestione del traffico e risolvere una quantità di problemi sociali e ambientali, ma in tutto il mondo è stato dimostrato che è difficilissimo persuadere la popolazione a rinunciare in misura consistente all'automobile. Negli Stati Uniti, dopo la seconda guerra mondiale, c'è stato un declino dei trasporti pubblici e dell'uso collettivo dell'automobile. Perfino in Europa occidentale, dove il costo medio del carburante si aggira intorno a un dollaro al litro e dove la densità della popolazione è molto alta e i trasporti di massa sono capillari, è ancora l'automobile a smaltire l'80 per cento del trasporto passeggeri.

Anche l'aumento del rendimento energetico è attraente, ma in dieci anni l'evoluzione dei metodi per risparmiare il carburante per autotrazione è stata minima. Sarebbe possibile introdurre a costi relativamente bassi carburanti alternativi per i motori a combustione interna, come il metanolo o il gas naturale, ma la corrispondente riduzione di inquinamento e di effetto serra sarebbe marginale (specie perché le compagnie petrolifere già spendono ogni anno miliardi di dollari per produrre benzine meno inquinanti).

Nel prossimo decennio i veicoli a propulsione elettrica, quelli cioè le cui ruote sono spinte da motori elettrici invece che da un motore a benzina e da una trasmissione meccanica, potrebbero ridurre in misura significativa l'inquinamento urbano e l'effetto serra. E potrebbero anche costituire il nucleo di un sistema di trasporti che, alla lunga, non produrrebbe quasi inquinamento. Benché la storia dei veicoli elettrici sia antica quanto quella del motore a combustione interna, solo certe innovazioni tecnologiche recenti (alcune delle quali sono il risultato della rivoluzione informatica e della Strategic Defense Initiative degli anni ottanta) potrebbero consentire a questa forma di trasporto di diventare abbastanza efficiente ed economica da competere con il trasporto a benzina.

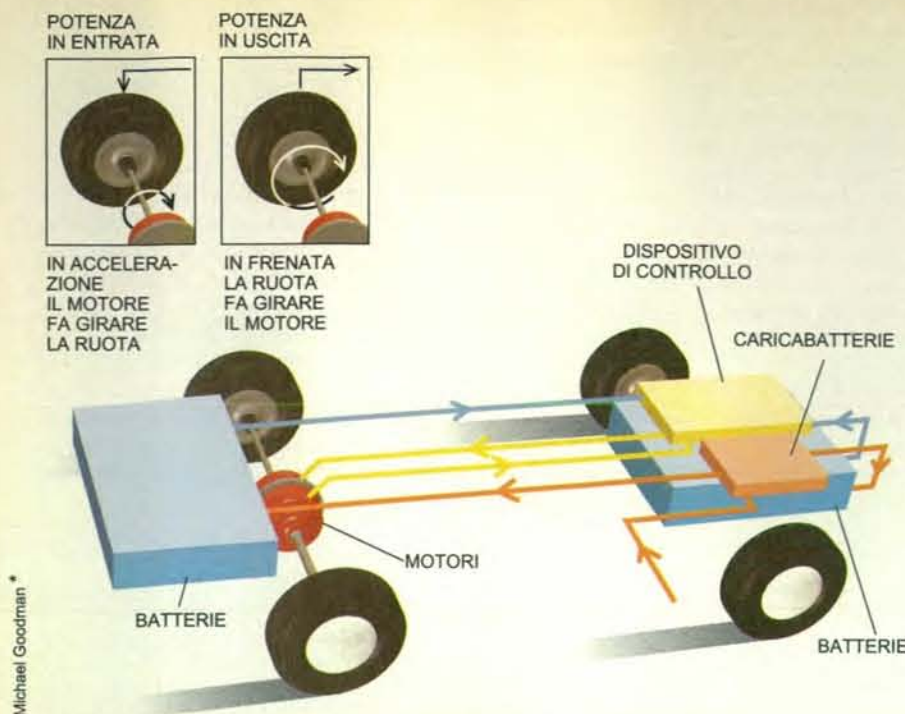
Per superare i vantaggi consolidati dei veicoli tradizionali, tuttavia, sarà necessario, da parte dell'industria e dei Governi, uno sforzo concertato per far ricadere sui consumatori, sotto forma di incentivi concreti all'acquisto, i benefici ambientali derivanti dalle automobili elettriche.

La locuzione «veicolo elettrico» riguarda non solo automobili mosse da batterie caricate alla rete, ma anche veicoli che generano l'elettricità a bordo o la accumulano in dispositivi diversi dalle batterie. Il loro denominatore comune è un motore elettrico efficiente che fa girare le ruote e ricava energia dall'inerzia dell'auto stessa quando questa rallenta. Il motore a combustione interna, invece, è sempre acceso e la sua energia, trasmessa mediante una serie di ingranaggi e frizioni, fa girare le ruote e aziona un generatore che alimenta i vari accessori elettrici dell'automobile.

Sono molte le ragioni per cui i veicoli elettrici sono più efficienti (e in genere meno inquinanti) dei veicoli a combustione interna. In primo luogo il motore elettrico è collegato direttamente alle ruote e quindi non consuma energia quando la vettura è ferma o procede in folle, il che accresce di circa un quinto il rendimento effettivo. I sistemi di frenatura a recupero, che usano il motore come generatore quando l'auto rallenta, possono restituire agli accumulatori fino al 50 per cento dell'energia cinetica del veicolo, rendendolo molto conveniente nel traffico urbano a singhiozzo.

Inoltre il motore trasforma in energia propulsiva più del 90 per cento dell'energia contenuta negli accumulatori, mentre il motore a combustione interna utilizza meno del 25 per cento dell'energia contenuta in un litro di benzina. Benché gli accumulatori vengano di solito ricaricati da un generatore il cui rendimento è in media solo del 33 per cento, resta comunque un significativo 5 per cento di rendimento in più a vantaggio della propulsione elettrica. Innova-

L'automobile elettrica della Renault è costituita da componenti leggeri, che riducono il peso che il motore deve spostare. I «veicoli urbani» di ridotta autonomia potrebbero rappresentare una nicchia di mercato particolarmente adatta alle caratteristiche delle automobili elettriche.

Gamma Liaison

I componenti fondamentali di un veicolo elettrico sono le batterie per l'accumulo dell'energia, un dispositivo per il controllo della potenza e i motori. Se l'energia è sotto forma elettrica, si elimina il bisogno di una trasmissione meccanica. Nella frenatura a ricupero (*riquadri*) il motore viene sfruttato come generatore, e restituisce energia al sistema di accumulazione, ogni volta che si usano i freni.

zioni come la generazione a ciclo combinato (in cui si estrae ulteriore energia dal calore dei gas di scarico di una centrale elettrica tradizionale) consentiranno presto di portare fino al 50 per cento il rendimento delle grandi centrali che produrranno l'energia per ricaricare gli accumulatori. Questo incremento farebbe aumentare in proporzione la quota di energia che finisce alle ruote di un veicolo elettrico. Un rendimento ancora più elevato è offerto dalle celle a combustibile, che «bruciano» idrogeno per generare l'elettricità direttamente a bordo di un veicolo.

I propulsori elettrici presentano ulteriori vantaggi per la qualità dell'aria urbana, perché consentono di allontanare dalla città il sito di produzione degli inquinanti. Le auto tradizionali emettono dai tubi di scarico monossido di carbonio e altri gas tossici in qualsiasi luogo si trovino, mentre l'inquinamento prodotto dalla generazione di energia elettrica è di norma localizzato intorno a poche centrali lontane dai centri abitati.

In pratica i veicoli elettrici a batteria non produrrebbero emissioni di monossido di carbonio e di idrocarburi volatili incombusti e presenterebbero emissioni di ossido d'azoto molto minori. L'inquinamento derivante dai moderni metodi di fabbricazione delle batterie e dei motori elettrici è dunque trascurabile.

I veicoli ibridi (dove cioè piccoli motori a combustione interna si combinano con motori elettrici e dispositivi per l'accumulo di elettricità) avranno emissioni ridotte quasi quanto i veicoli elettrici a batteria; in effetti gli ibridi potrebbero essere preferibili in zone dove l'elettricità viene generata soprattutto con il carbone. Naturalmente gli effetti dei veicoli elettrici sull'inquinamento atmosferico sarebbero massimi laddove l'elettricità viene ricavata da fonti non inquinanti (solare, nucleare, eolica o idrica). Tra i massimi beneficiari vi sarebbero la California, dove l'elettricità è prodotta per lo più in centrali a gas naturale sotto stretto controllo o in centrali nucleari o idroelettriche prive di emissioni; e la Francia, dove l'elettricità è soprattutto di origine nucleare.

Questi benefici ambientali potrebbero essere molto importanti. In molte aree metropolitane degli Stati Uniti l'atmosfera è molto più inquinata di quanto consentirebbero le norme sulla qualità dell'aria e gran parte di queste aree saranno fuori norma anche nel 2000. A Los Angeles l'inquinamento è così elevato che anche se tutti i veicoli scomparissero dalle strade, la città non riuscirebbe a rientrare nelle norme. Molte altre zone degli Stati Uniti hanno scarse possibilità di soddisfare le disposizioni di legge, anche usando benzine più pulite e motori a combustione interna migliori. E in città come Bangkok, Katmandu o Città di Messico l'inquinamento atmosferico è molto più grave che a Los Angeles.

I veicoli elettrici oggi sul mercato sfruttano batterie al piombo, che si caricano a una normale presa di corrente. È improbabile che questi dispositivi di colpo conquistino il mercato. Non solo le batterie sono costose e ingombranti, ma tra una carica e l'altra riescono a far muovere il veicolo per poco più di 150 chilometri. Questo problema, tuttavia, viene spesso esagerato. In primo luogo sembra che esista un discreto mercato per i veicoli di breve autonomia; in secondo luogo, già ora nuove batterie stanno passando dal laboratorio alla linea di produzione.

Un'indagine che ho condotto con i miei colleghi dell'Università della California a Davis indica che circa la metà delle famiglie che possiedono più di un'automobile (cioè la maggior parte delle famiglie statunitensi, che coprono oltre il 70 per cento degli acquisti di nuove automobili) potrebbe facilmente adattarsi a usare la seconda automobile entro un raggio inferiore ai 180 chilometri. Parecchi degli intervistati erano disposti ad accettare anche un'autonomia molto inferiore. I benefici ambientali e il vantaggio di poter caricare le batterie a casa (a molti non piace per nulla l'idea di caricarle presso stazioni di rifornimento) compensano la limitazione di autonomia.

È probabile che il ruolo delle batterie per i veicoli elettrici sarà sempre meno importante. Tra le alternative in via di sperimentazione vi sono gli ultracondensatori, che accumulano grandi quantità di elettricità e si possono caricare e scaricare rapidamente, i volani, che accumulano l'energia in un rotore in movimento, e le celle a combustibile, che trasformano un combustibile chimico in elettricità emettendo vapore acqueo.

Le prime fasi di sviluppo degli ultracondensatori si devono alla Strategic Defense Initiative, il piano di «Guerre stellari» dell'Amministrazione Reagan per la difesa contro i missili balistici. Con tecniche di fabbricazione avanzate si possono eliminare quelle esigue imperfezioni della pellicola isolante di un normale condensatore che causano le dispersioni della carica, mentre nuovi materiali consentono di alternare il carbone e l'elettrolita liquido di un condensatore molto più finemente che in passato. Di conseguenza gli ultracondensatori possono accumulare circa 15 wattora (un'energia sufficiente a far girare per circa un minuto un motore da un cavallo vapore) in un litro di volume; e un dispositivo da un litro può scaricarsi al tasso di 3 chilowatt. Gli ultracondensatori esistono già sotto forma di piccole unità, che sono usate nei calcolatori, negli orologi e nei rasoi elettrici.

I volani furono usati per la prima volta nei trasporti negli anni cinquanta: autobus mossi da volani percorrevano le strade di Yverdon, in Svizzera, ma le loro prestazioni erano lontane dall'essere soddisfacenti. Da allora questi sistemi hanno subito modifiche sostanziali: oggi esistono rotori compositi che compiono fino a 100 000 rotazioni al secondo e la cui velocità è limitata solo dalla resistenza dei bordi alla trazione. I cuscinetti magnetici hanno ridotto l'attrito al punto che un rotore riesce a mantenere il 90 per cento della propria energia per quattro giorni. È probabile che i veicoli in commercio saranno dotati dei primi ultracondensatori e volani ad alta potenza intorno al 2000. Vista la loro capacità di erogare potenza molto rapidamente, saranno accoppiati a batterie che saranno sufficienti per le normali esigenze di guida, mentre i condensatori o i volani entreranno in gioco nei momenti particolarmente impegnativi, come le accelerate e le salite. Questa combinazione consentirà di usare gruppi di batterie più piccoli e di allungarne la durata attiva.

Nemmeno le proiezioni più ottimistiche sulle tecniche avanzate per l'accumulo di energia reggono il confronto con i 2100 chilojoule contenuti in un serbatoio di 38 litri di benzina, ed è per questo che molti ricercatori prevedono l'uso di sistemi ibridi per i veicoli elettrici più diffusi: la spinta verrebbe da motori elettrici, ma l'energia sarebbe fornita da piccoli motori a combustione interna che caricherebbero le batterie, i condensatori e le altre fonti di energia. La potenza richiesta da una normale automobile guidata in autostrada è di soli 10 chilowatt circa, quindi basta un motore piuttosto piccolo; gli accumulatori si caricano durante i periodi di erogazione minima e si scaricano rapidamente durante le accelerazioni. Funzionando a velocità costante, i motori a combustione interna possono avere un rendimento fino al 40 per cento, e quindi il rendimento complessivo di un veicolo ibrido può essere perfino superiore a quello di un'automobile completamente elettrica.

Molti ricercatori vedono in questa soluzione l'erede più probabile del motore a combustione interna, e le vetture ibride costituiscono un elemento di grande interesse per il Consorzio per una nuova generazione di veicoli, un ente molto attivo nato dalla collaborazione tra il Governo statunitense e le tre maggiori case automobilistiche. Le celle a combustibile bruciano idrogeno e producono vapore acqueo e anidride carbonica (senza emettere in pratica altri effluenti) e generano elettricità. (Alcune versioni modificate bruciano anche altri combustibili, tra cui gas naturale, metano e benzina, ma in tal caso le emissioni aumentano e il rendimento cala.)

Benché questi dispositivi siano noti soprattutto per essere le fonti energetiche dei veicoli spaziali, una delle prime celle a combustibile fu impiegata nel 1959 in un trattore agricolo sperimentale. Prototipi di autobus con celle a combustibile recentemente realizzati hanno dimostrato che questa tecnologia è attuabile, ma il parametro più critico è ancora il costo. Le celle a combustibile con membrana a scambio di protoni, che sono oggi le più interessanti per l'impiego sui veicoli, ancora pochi anni fa costavano più di 100 000 dollari per chilowatt, ma si ritiene che verso la fine del secolo costeranno solo poche migliaia di dollari e forse, quando il volume di produzione sarà a regime, 100 dollari o meno per chilowatt (e quindi saranno competitive rispetto ai motori a combustione interna). Nel luglio 1996 la Daimler-Benz ha annunciato che potrà forse mettere in vendita una Mercedes fornita di celle a combustibile già nel 2006.

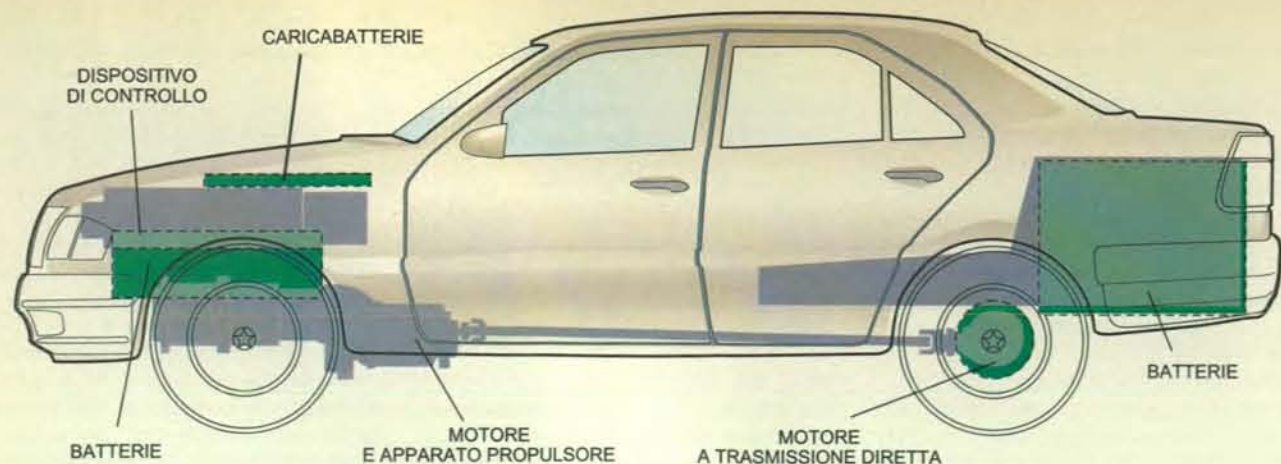
In linea di massima, le celle a combustibile saranno il mezzo meno inquinante per muovere i veicoli. Inoltre il combustibile ideale per queste celle, sotto il profilo sia tecnico sia ambientale, è l'idrogeno. L'idrogeno si può ricavare in molti modi, ma quando i combustibili fossili diverranno più scarsi e costosi, il metodo più conveniente sarà quello di estrarlo dall'acqua mediante celle solari. Se si adottasse l'idrogeno su ampia scala, il sistema dei trasporti nel suo complesso sarebbe quasi innocuo per l'ambiente e l'energia sarebbe del tutto rinnovabile. Il costo di questo combustibile rinnovabile a base d'idrogeno non arriverebbe a un dollaro per l'equivalente di un litro di benzina.

Negli ultimi anni non solo le fonti di energia, ma anche certi aspetti della tecnologia automobilistica hanno fatto notevoli progressi. Molte nuove possibilità si stanno aprendo grazie a una rivoluzione tecnologica nei dispositivi di accumulazione e di conversione dell'elettricità, nei controlli elettronici, nel software e nei materiali. Per esempio i progressi dell'elettronica di potenza hanno consentito la costruzione di gruppi motore-trasmissione che pesano e costano solo il 40 per cento dei loro predecessori di dieci anni fa. Fino ai primi anni novanta, in pratica tutti i veicoli elettrici adottavano motori a corrente continua, più facili da alimentare con le batterie. Poi la costruzione di invertitori piccoli e leggeri (dispositivi che trasformano la corrente continua fornita da una batteria in corrente alternata, che è più efficiente per l'alimentazione di un motore) ha consentito di abbandonare la corrente continua. I motori a corrente alternata sono più affidabili e di manutenzione più facile, e hanno un rendimento superiore a quelli a corrente continua; sono anche più facili da adattare alla frenatura a recupero. In effetti un motore per veicoli elettrici (con la relativa elettronica di potenza) è oggi più piccolo, più leggero e di fabbricazione più economica di un motore a com-

I veicoli elettrici riducono l'inquinamento
(Variazione percentuale dell'emissione)

	IDROCARBURI	MONOSSIDO DI CARBONIO	OSSIDI DI AZOTO	OSSIDI DI ZOLFO	PARTICOLATO
FRANCIA	–99	–99	–91	–58	–59
GERMANIA	–98	–99	–66	+96	–96
GIAPPONE	–99	–99	–66	–40	+10
GRAN BRETAGNA	–98	–99	–34	+407	+165
STATI UNITI	–96	–99	–67	+203	+122
CALIFORNIA	–96	–97	–75	–24	+15

FONTI: Choosing an Alternative Fuel: Air Pollution and Greenhouse Gas Impacts (OECD, Parigi, 1993). Le stime per gli Stati Uniti sono tratte da Q. Wang, M. DeLuchi e D. Sperling, *Emission Impacts of Electric Vehicles* in «Journal of the Air and Waste Management Association», 40, n. 9, pp. 1275-1284, settembre 1990.

Stando alle simulazioni, le automobili elettriche a batterie, se accettate universalmente, abbatterebbero le emissioni dei più importanti inquinanti urbani. Tuttavia, in certi casi l'inquinamento prodotto dalle centrali elettriche compenserebbe in parte questi vantaggi e incrementerebbe addirittura certi tipi di inquinamento, specie nei paesi (come Gran Bretagna e Stati Uniti) che fanno ampio ricorso al carbone e al petrolio.

Nell'ultimo decennio la microelettronica e i progressi nel campo delle batterie e dei motori hanno fatto decrescere anche del 60 per cento il peso degli accumulatori e dei componenti della trasmissione dei veicoli elettrici (nella figura i dispositivi vecchi sono in grigio, i nuovi in verde scuro e la sovrapposizione in verde chiaro). Tale riduzione ha fatto diminuire il peso delle sospensioni e dei componenti strutturali della vettura, consentendo prestazioni equivalenti con componenti più piccoli.

bustione interna di analoga categoria.

Tutte le grandi case automobilistiche del mondo investono oggi per sviluppare i veicoli elettrici e anche per migliorare tecnologie meno critiche, come quelle del riscaldamento dell'abitacolo e degli pneumatici. I componenti avanzati frutto di queste ricerche costituiranno gli elementi per costruire i veicoli del futuro, pulitissimi e ad altissimo rendimento; ma nel frattempo molti di essi trovano impiego nei veicoli con motore a combustione interna.

Negli anni novanta le case automobilistiche hanno speso forse un miliardo di dollari per i veicoli elettrici, ma nel quadro globale dell'industria si tratta di un investimento relativamente modesto. Solo negli Stati Uniti, le aziende automobilistiche spendono più di cinque miliardi di dollari all'anno per la pubblicità e ancora di più per ricerca e sviluppo. E negli ultimi dieci anni le compagnie petrolifere hanno speso circa dieci miliardi di dollari negli Stati Uniti per mettere le raffinerie in grado di produrre nuove formule di benzina a bassa emissione di inquinanti.

Gran parte di questi investimenti è stata fatta sinora per le pressioni dei vari Stati. Nel 1990 la California ha promulgato un decreto sui veicoli a emissione nulla (ZEV, *zero-emission vehicle*) che impone alle grandi case di produrre almeno il 2 per cento di veicoli a emissione nulla entro il 1998, il 5 per cento entro il 2001 e il 10 per cento entro il 2003 (queste percentuali corrispondono a circa 20 000 veicoli l'anno per il 1998). Chi non rispettasse queste quote pagherebbe una multa di 5000 dollari per ogni ZEV non prodotto. Anche gli Stati di New York e del Massachusetts hanno adottato provvedimenti analoghi.

Le industrie dell'auto si sono opposte duramente al decreto ZEV, ma nello stesso tempo hanno anche intensificato i programmi di ricerca e sviluppo per i veicoli elettrici nel caso in cui il loro contrattacco legale fallisca (e nel caso in cui negli Stati Uniti o all'estero si aprano mercati per le auto elettriche). Le industrie dell'automobile lamentano soprattutto di essere state costrette a realizzare un prodotto costoso senza che fosse concesso ai clienti alcun incentivo per l'acquisto, benché il Governo federale, i Governi dei singoli Stati e le amministrazioni locali abbiano promosso proprio questi incentivi.

Nel marzo scorso il legislatore californiano, cedendo alle pressioni delle industrie automobilistiche e delle compagnie petrolifere, eliminò le quote del 1998 e del 2001, limitandosi a richiedere l'impegno ad avviare le vendite dei veicoli elettrici e a ribadire il traguardo del 2003. Secondo gli analisti dell'industria, negli Stati Uniti le vendite non supereranno i 5000 veicoli se non dopo l'inizio del secolo.

Un fattore determinante del successo dei veicoli elettrici è il loro prezzo, elemento ancora molto incerto. La EV1 della General Motors, appena uscita, ha un prezzo nominale di 33 000 dollari; la Solectria vende i propri veicoli elettrici, prodotti in quantità modeste, a prezzi che vanno da 30 000 a 75 000 dollari, a seconda del tipo di batterie (quelle a nichel e idruro metallico, capaci di autonomia superiore a 320 chilometri, fanno salire il prezzo di 40 000 dollari rispetto a un veicolo con batterie al piombo). La natura controversa del processo normativo ha spinto oppositori e sostenitori a fare stime troppo alte o troppo basse rispetto alla realtà, quindi è impossibile dire quanto costeranno i veicoli finché non ne comincerà la produzione in massa. Un confronto con la storia dei prezzi di altri prodotti, tra cui le automobili tradizionali, indica comunque che la produzione su ampia scala potrebbe comprimere i prezzi ben al di sotto della metà del loro livello attuale (*si veda l'illustrazione a pagina 86*).

Di fronte all'avvento ineluttabile dei veicoli elettrici, le case automobilistiche stanno studiando il modo per produrli a basso costo. Molte (tra cui la Peugeot in Francia) si limitano a rimuovere dai veicoli esistenti motore, serbatoio di benzina e trasmissione e a inserire batterie, sistemi di controllo e motore elettrico con un minimo di modifiche. Altre, tra cui la Ford, vendono «alianti» (scocche di auto prive dei componenti della propulsione e della trasmissione) a piccole aziende che li convertono, dotandoli di propulsore elettrico. Una terza via consiste nel costruire veicoli piccolissimi, come la Smart della Mercedes (nota come Swatchmobile), che si rivolgono all'emergente nicchia di mercato dei veicoli urbani ad autonomia limitata. Fra tutte le grandi case, solo la General Motors si è finora impegnata nella produzione in massa di un'ordinaria automobile progettata da zero in vista della propulsione elettrica.

È probabile che a causa del costo delle batterie (e delle celle a combustibile) i veicoli elettrici saranno sempre più costosi dei veicoli a benzina di livello analogo. Tuttavia il costo per chilometro dei veicoli elettrici e a combustione interna dovrebbe tendere a coincidere. Il carburante dei veicoli elettrici è a buon mercato, la manutenzione è minima e a quanto pare i motori elettri-

L'auto elettrica in Italia

Piazza Vittorio Veneto, a Torino, è dal 23 settembre scorso il centro di un esperimento di dimensioni limitate, ma che potrebbe preludere a un cambiamento radicale dell'idea di circolazione urbana. Grazie a un'intesa tra il Comune sabaudo e Fiat Auto, venti «Panda Elettra» sono a disposizione di chiunque per il noleggio a ore nel cosiddetto «Elettra Park», un'area nella quale è possibile lasciare in custodia la propria autovettura.

Le auto elettriche utilizzate per questa iniziativa sono dotate di un'autonomia di circa 50 chilometri e godono di ogni possibile agevolazione di circolazione e posteggio nell'ambito cittadino: possono cioè accedere a tutte le zone a traffico limitato (anche nei giorni di blocco del traffico) e posteggiare gratuitamente in tutto il centro, anche nelle cosiddette «strisce blu».

Più che ragionevole il costo: 3500 lire all'ora (e 5000 a partire dalla terza) spendibili attraverso una carta elettronica prepagata. Fatto ritorno alla base, l'utente non deve fare altro che riagganciare la vettura alla presa di corrente della colonnina di ricarica, per poi inserire la carta elettronica nel lettore (che detrae automaticamente il prezzo del noleggio) e risalire sulla propria automobile.

Alla «prova su strada» di Torino (che del resto fa seguito a un esperimento analogo condotto a Livorno dal dicembre 1993 con cinque modelli) il Centro Ricerche Fiat sta associando uno sforzo esplorativo che - dopo la Downtown presentata due anni or sono al Salone di Ginevra - ha dato forma a un nuovo interessante prototipo sperimentale di auto elettrica, la «Zic».

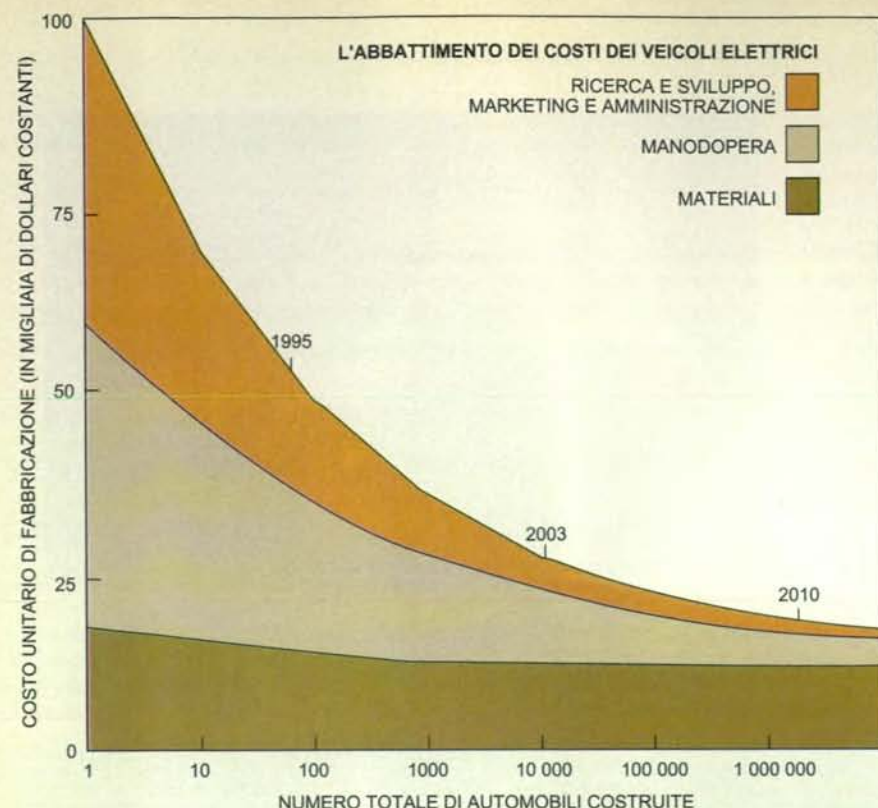
Il progetto di questa autovettura, sviluppata nell'ambito del Progetto finalizzato «Materiali speciali per tecnologie avanzate» del Consiglio nazionale delle ricerche, è servito soprattutto ad approfondire l'impiego di materiali particolari in applicazioni del tutto innovative.

Leggerezza, basso fabbisogno energetico e ampie possibilità di riciclaggio dei materiali sono le tre caratteristiche privilegiate nel prototipo, con salvaguardia dei fattori sicurezza e costo. Due porte e quattro posti per un'automobile dalla scocca altamente innovativa, composta da due sottostrutture: lo *space frame* in alluminio e i pannelli in materiale composito polimerico, con struttura a sandwich. La riduzione del peso così conseguita è del 30 per cento, con un incremento della rigidezza del 20 per cento. Il peso a vuoto dell'autovettura (con batterie al $Na/NiCl_2$) viene così contenuto in 850 chilogrammi.

Il gruppo motopropulsore ad alta efficienza (dal 5 al 7 per cento di rendimento in più rispetto ai motori tradizionali) produce un'elevata coppia e consente il recupero di energia durante la frenata. Tutto ciò consente di ottenere un'autonomia di 230 chilometri a 50 chilometri all'ora (170 a ciclo urbano) con un tempo di ricarica di circa cinque ore. La velocità massima della Zic è di 100 chilometri all'ora, e la massima pendenza superabile è del 25 per cento.

La tecnologia dell'auto elettrica, a quanto mostrano questi tentativi, non sembra dunque, anche nel nostro paese, lontana dal trovare qualche possibilità di applicazione più «quotidiana». I problemi di qualità dell'ambiente nei maggiori centri urbani (inquinamento atmosferico e acustico) reclamano a gran voce risposte operative e praticabili dal punto di vista economico. A questo punto verrebbe spontaneo al comune cittadino esortare sia la grande industria dell'automobile europea sia le autorità governative a una rottura di indugi, e a una maggiore audacia (rispettivamente negli investimenti e negli incentivi) per accelerare un processo che, prima o poi, finirà per imporsi per forza degli eventi (ovvero in termini di dollari al barile, se solo si renderanno disponibili fonti energetiche sicure e a buon mercato).

Forse l'auto elettrica è già più «matura» del mercato che dovrebbe recepirla; un più intenso sforzo verso questa opzione, tuttavia, potrebbe rivelarsi alla lunga come l'investimento più remunerativo per tutti.

L'inaugurazione, il 23 settembre 1996, del parcheggio di interscambio auto elettriche in piazza Vittorio Veneto a Torino. In alto, il prototipo della «Zic».

Le economie di scala dovrebbero permettere ai costruttori di ridurre il prezzo delle automobili elettriche quando i volumi di produzione supereranno i livelli attuali (pochi veicoli al giorno). Alla lunga la voce più importante del costo complessivo sarà il costo dei materiali. (Queste stime sono ricavate dall'esperienza fatta con la fabbricazione dei veicoli tradizionali, prodotti sulla base di 100 000 o più unità all'anno per una fabbrica media.)

ci hanno una durata molto maggiore di quelli a benzina. Considerando anche il costo dell'inquinamento atmosferico e dell'effetto serra e altri costi esterni (cioè quelli che oggi sono pagati dalla società nel suo complesso), la bilancia penderebbe in molti casi a favore dei veicoli elettrici.

Per gli amministratori e i venditori il problema è quello di far sì che i consumatori tengano conto di tutti questi costi, obiettivo che finora non è stato facile conseguire. In California, dove una severa legislazione sulla qualità dell'aria ha aperto la strada all'avvento dei veicoli elettrici, il progresso è stato rallentato dall'opposizione sia delle case automobilistiche sia delle compagnie petrolifere. A livello nazionale, le prime speranze suscitate dal Consorzio per una nuova generazione di veicoli sono crollate per l'esiguità dei fondi, per le lotte politiche e per un eccesso di prudenza. Questo conflitto interno ha avuto come conseguenza che i veicoli che saranno costruiti nel 2004 saranno stati progettati nel 1997: è quindi probabile che il Consorzio si limiterà ad adottare miglioramenti incrementali minimi invece di sostenere a spada tratta l'introduzione delle celle a combustibile e di altre tecnologie radicalmente nuove.

Nondimeno sembra certo che prima o poi la tecnologia dei motori elettrici soppianterà quella dei motori a combustione interna, con un processo magari non rapido, uniforme e completo, ma inevitabile. Il problema è quando, in che forma e come pilotare la transizione. Forse la lezione più importante ricavata dalla situazione attuale è che il Governo dovrebbe fare la cosa che sa fare meglio, cioè offrire al mercato ampi incentivi che riportino i costi esterni, come l'inquinamento, all'interno dei calcoli economici dei consumatori e delle aziende, e convogliare gli investimenti verso l'adozione di tecnologie di punta e innovative e non verso attività che le aziende private svolgerebbero comunque.

L'avvento dei veicoli elettrici ha alcune importanti implicazioni economiche. Chiunque metta per primo in vendita tecnologie di costo competitivo per i veicoli elettrici troverà in tutto il mondo allettanti mercati per l'esportazione. I veicoli elettrici saranno i benvenuti dove l'inquinamento è più pesante o addirittura irrimediabile; dove le prestazioni di punta del veicolo sono ritenute meno importanti dell'affidabilità e della facilità di manutenzione; dove l'elettricità è a buon mercato fuori delle ore di massimo carico e dove gli investimenti nella distribuzione petrolifera sono modesti. In effetti, se gli Stati Uniti e gli altri paesi più importanti non agiranno, è possibilissimo che la prossima generazione di giganti dell'automobile sorga nei paesi sottosviluppati, dove oggi le automobili sono piuttosto scarse.

DANIEL SPERLING dirige l'Institute of Transportation Studies dell'Università della California a Davis, dove è professore di ingegneria civile e di studi ambientali. Ha scritto due libri e oltre 100 articoli sui veicoli elettrici e altre questioni ambientali relative ai trasporti. Sperling presiede un comitato del National Research Council sui combustibili alternativi per autotrazione. È anche membro di un comitato della National Academy of Sciences che si occupa di trasporti e ambiente.

SPERLING D., *New Transportation Fuels: A Strategic Approach to Technological Change*, University of California Press, 1988.

Choosing an Alternative Transportation Fuel: Air Pollution and Greenhouse Gas Impacts, distribuito da OECD Publications and Information Center, Washington, D.C., OECD, Parigi, 1993.

MacKENZIE JAMES J., *The Keys to the Car*, World Resources Institute, 1994.

SCHIFFER BRIAN MICHAEL, *Taking Charge: The Electric Automobile in America*, Smithsonian Institution Press, 1994.

SPERLING D., *Future Drive: Electric Vehicles and Sustainable Transportation*, Island Press, 1995.

KURANI KENNETH, TURRENTINE THOMAS e SPERLING DANIEL, *Testing Electric Vehicle Demand in «Hybrid Households» Using a Reflexive Survey* in «Transportation Research», parte D, 1, n. 2 (in stampa).

Vita quotidiana in un villaggio dell'antico Egitto

I documenti scritti provenienti dall'insediamento operaio di Deir el-Medina, presso Tebe, consentono di ricostruire un quadro affascinante delle attività quotidiane durante il Nuovo Regno

di Andrea G. McDowell

Durante il cosiddetto periodo del Nuovo Regno (1539-1075 a.C.) la capitale meridionale dell'Egitto, Tebe, si sviluppò fino a diventare uno dei maggiori centri urbani del mondo antico. In quest'epoca furono costruiti gli enormi complessi cultuali di Karnak e Luxor, che ancor oggi dominano la sponda orientale del Nilo nella città moderna (attualmente chiamata Luxor). La vicina Valle dei re, sulla sponda occidentale del Nilo, comprende una sessantina di tombe reali, compresa quella famosissima di Tutankhamun. Centinaia di tombe private, alcune delle quali splendidamente ornate di dipinti, sono sparse lungo tutta la base delle rupi che si levano sulla riva occidentale del fiume.

Sebbene alcuni dei dipinti nei monumenti privati ci permettano di gettare uno sguardo sulla vita opulenta della nobiltà, nel complesso i templi e le tombe conservatisi fino a oggi ci parlano molto più dell'esperienza religiosa e delle credenze riguardanti l'aldilà che non dell'esistenza di tutti i giorni. La vita quotidiana è scarsamente documentata perché, al contrario dei monumenti di pietra che oggi abbiamo davanti agli occhi, la maggioranza delle abitazioni - costruite con mattoni seccati al sole - è scomparsa a causa dell'umidità della piana alluvionale, insieme con gli arredi e con le eventuali testimonianze scritte che ci avrebbero documentato la vita di quei pochi che sapevano leggere e scrivere. Al margine occidentale della vasta città antica, però, i resti di una piccola comunità sono sfuggiti alla distruzione generale: si tratta del villaggio oggi conosciuto col nome di Deir el-Medina, nel quale dimoravano gli artigiani che scavarono e decorarono le tombe della Valle dei re.

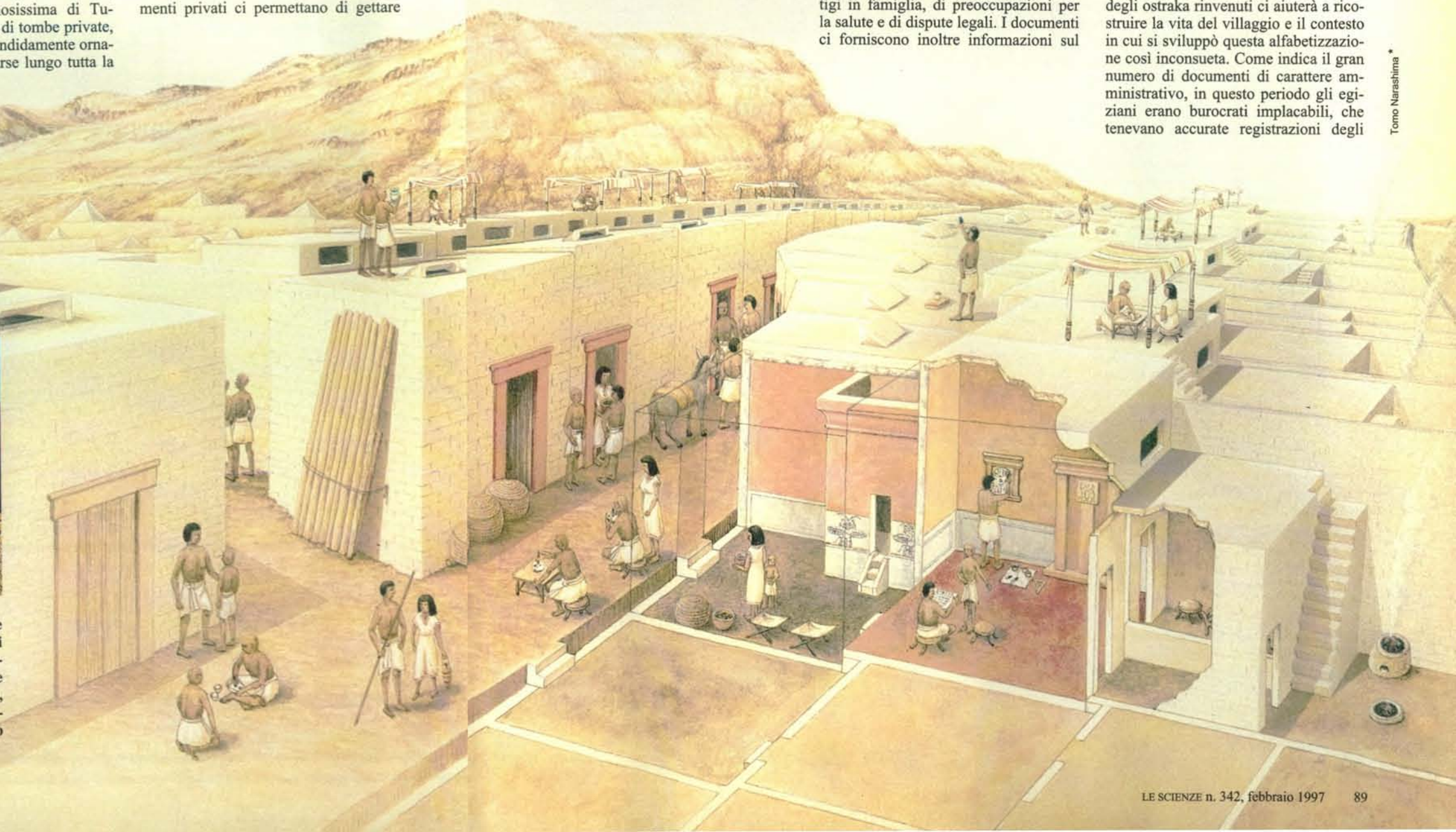
Trovandosi in una zona arida e abbastanza isolata, il sito si è conservato sorprendentemente bene: in alcuni punti case e tempietti si conservano in alzato anche per un paio di metri. Nella prima metà di questo secolo, gli archeologi hanno trovato un gran numero di oggetti di carattere sia cultuale sia domestico, oltre a tombe intatte contenenti sarcofagi, mobili e capi di vestiario. Inoltre, in tutto il sito, ma soprattutto nelle zone di discarica dei rifiuti, sono state rinvenute decine di migliaia di documenti scritti, per lo più risalenti al periodo compreso fra il 1275 e il 1075 a.C. Alcuni dei testi sono su fogli di papiro, ma la maggior parte è scritta su cocci di ceramica o frammenti di calcare liscio e bianco, i cosiddetti *ostraka*, che servivano come materiale per prendere appunti.

Questi scritti ci restituiscono un'immagine viva e concreta degli abitanti del villaggio: vi si trovano documenti amministrativi, ma anche poesie d'amore e lettere private che parlano di litigi in famiglia, di preoccupazioni per la salute e di dispute legali. I documenti ci forniscono inoltre informazioni sul sistema educativo dell'antico Egitto, un argomento di cui mi occupo da qualche tempo. La mole stessa dei testi provenienti da Deir el-Medina fa pensare che, almeno in alcuni periodi della storia del villaggio, la maggior parte degli uomini sapesse leggere e scrivere. (Non è chiaro se questo valesse anche per le donne di Deir el-Medina: si conoscono lettere inviate da donne, ma è possibile che venissero dettate a scribi di sesso maschile.) Questa diffusa alfabetizzazione contrasta nettamente con la situazione del resto della società egiziana, nella quale, durante il Nuovo Regno, la percentuale di individui che sapevano leggere e scrivere si aggirava intorno all'1-2 per cento. Gli ostraka chiariscono come mai gli abitanti del villaggio avessero raggiunto un livello di istruzione così notevole.

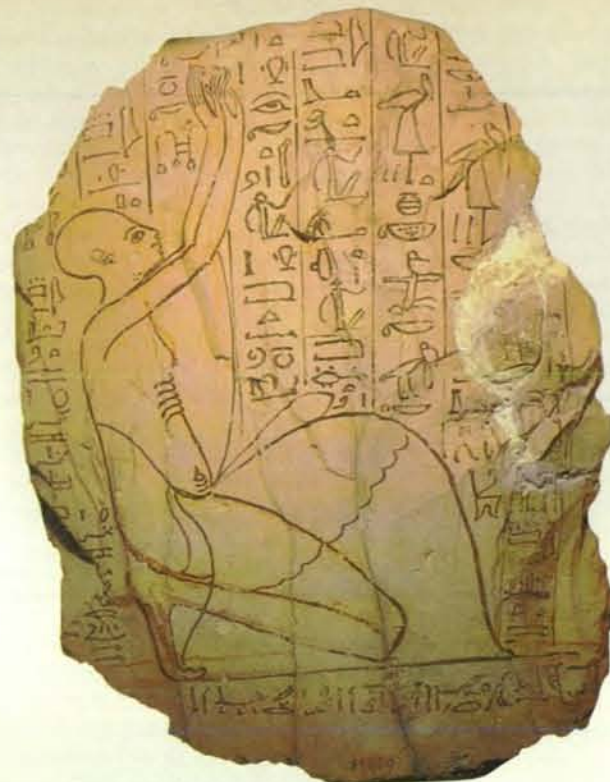
Prima di considerare più da vicino il sistema educativo di Deir el-Medina, tuttavia, un rapido esame di alcuni degli ostraka rinvenuti ci aiuterà a ricostruire la vita del villaggio e il contesto in cui si sviluppò questa alfabetizzazione così inconsueta. Come indica il gran numero di documenti di carattere amministrativo, in questo periodo gli egiziani erano burocrati implacabili, che tenevano accurate registrazioni degli

O. Louis Mazzatenta, National Geographic Image Collection

Tomo Narashima

Il villaggio di Deir el-Medina (*nella fotografia*) è situato presso le rovine di Tebe. L'insediamento ospitava gli operai e gli scribi che lavoravano alle tombe della Valle dei re. Questi artigiani utilizzavano schegge di calcare, i cosiddetti *ostraka*, come materiale poco costoso per redigere documenti ufficiali e privati, lettere, poesie e fare schizzi. Migliaia di ostraka sono stati portati alla luce in questo villaggio assai ben conservato, mostrato nel disegno come poteva apparire circa 3000 anni fa.

Fitzwilliam Museum, Università di Cambridge

Museo egizio, il Cairo

I ritratti di un tagliapietra (*qui sopra*) e di uno scriba (*a destra*) illustrano due distinti stili di disegno documentati dagli ostraka di Deir el-Medina. Lo schizzo alquanto informale del tagliapietra con scalpello e mazza mostra tratti esagerati, come il nasone bulboso, il mento non rasato e la bocca semiaperta, senza dubbio per ottenere un effetto comico. L'autoritratto dello scriba Amenhotep che venera il dio Thot è invece conforme ai canoni formali dell'arte egizia.

attrezzi consegnati agli operai che lavoravano nelle tombe, delle razioni fornite alle varie squadre, del progredire dei lavori e di ogni altro dettaglio che potesse essere quantificato.

Molti sono gli scritti di carattere privato, e parecchi puramente utilitari: ricevute di acquisti o documentazioni di dispute legali (a quanto pare gli abitanti del villaggio erano prontissimi a intentare cause). I testi più appassionanti sono forse le lettere personali, che immergono realmente il lettore nell'Egitto del Nuovo Regno. In una di queste missive, Pay scrive al figlio riguardo alla malattia degli occhi da cui è afflitto (senza dubbio un rischio comunemente associato al lavoro della costruzione di tombe, a causa della polvere, della scarsa illuminazione e delle schegge di pietra):

«Il pittore Pay dice a suo figlio, il pittore Pre[emhab?]: non voltarmi le spalle; io non sto bene. Non c[essare] di compiangermi, perché io sono nell'[oscurità(?) da quando] il mio signore Amon [mi ha voltato] le spalle.

Ti prego di portare miele per i miei occhi, e anche ocra che viene di nuovo modellata in mattoni, e vero bistro nero per gli occhi. [Affrettati!] Pensa tu a questo! Non sono forse tuo padre? Ora io sono afflitto dalla disgrazia; cerco la vista e non l'ho più.»

Il lamento di Pay non è sorprendente: la cecità avrebbe reso completamente invalido un artigiano il cui compito era quello di dipingere le figure e i geroglifici nell'interno delle tombe. Descrizioni della miscela di miele, ocra e pittura per gli occhi richiesta da Pay appaiono nei papiri medici, e questo fa pensare che si trattasse di un rimedio comune. In effetti, il miele ha proprietà antisettiche; l'ocra - un ingrediente di molte altre prescrizioni dell'epoca - ha un effetto rinfrescante sulle palpebre e si riteneva che riducesse il gonfiore. Dato che molti operai soffrivano di simili malanni agli occhi, questo trattamento doveva essere ben noto, e Pay stava prescrivendolo da sé o, in alternativa, chiedeva al figlio di procurargli ingredienti prescritti da un medico.

Museo egizio, Torino

Fra gli strumenti e i materiali usati dagli scribi di Deir el-Medina per dipingere le figure e i geroglifici che ornavano le tombe reali vi erano pennelli di varie dimensioni, una scodellina con pigmento rosso e minerali non ancora macinati.

Circa metà dei testi rinvenuti a Deir el-Medina ha carattere religioso o letterario. Nel sito sono state rinvenute copie di gran parte dei «classici» dell'antica letteratura egizia; in alcuni casi, gli ostraka trovati nel villaggio costituiscono l'unica copia superstite di un'opera. Questi classici costituivano una componente fondamentale dell'istruzione di uno studente: migliaia di testi scolastici contengono brani di capolavori letterari del Medio Regno (circa 2000-1640 a.C.), composti in una lingua che per gli studenti era estranea più di quanto lo sia per noi il volgare di Dante. Inoltre molti abitanti del villaggio erano a loro volta scrittori, e componevano testi scolastici, inni e lettere. Per esempio, lo scriba Amennakhte scrisse una poesia in lode della grande città di Tebe, situata sulla sponda opposta del Nilo:

Che cosa dicono a se stessi,
nei loro cuori ogni giorno,
coloro che sono lontani da Tebe?
Essi trascorrono il giorno
sognando [?] il suo nome, [dicendo:]
«Se solo la sua luce fosse nostra!»...
Il pane che in essa si trova ha più sapore
che una focaccia fatta con grasso d'oca.
La sua [acqua] è più dolce del miele;
la si beve fino all'ebbrezza.
Ammirate, così si vive a Tebe!
Per essa il cielo fa spirare due volte
più brezza [fresca].

Gli abitanti di Deir el-Medina avevano un'alta opinione della conoscenza e della capacità letteraria, come indica un papiro rinvenuto nell'archivio di uno scriba qui residente. In questo brano, l'autore presenta un omaggio inconsueto alla conoscenza: mentre altri documenti tendono a enfatizzare soprattutto l'abilità nello scrivere e la familiarità con la letteratura classica, questa descrizione della professione di scriba sottolinea la capacità creativa, la composizione di testi originali e la fama che può arridere dopo la morte. In breve, l'autore fa appello alla grande aspirazione all'immortalità che era tipica degli egizi:

Gli scribi pieni di saggezza, dal
[tempo che venne dopo gli dèi,
e quelli che predissero il futuro,
il loro nome dura eternamente:
(eppure) essi sono andati, hanno
[compiuto il loro tempo e tutti i
[loro contemporanei sono obliati.
Essi non hanno costruito piramidi di
[bronzo con stele di ferro,
non hanno progettato di lasciar come
[eredi (dopo di loro)
i figli (della loro carne) che
[pronunciassero il loro nome:
essi si sono fatti come eredi
i libri e gli insegnamenti che hanno fatto.

L'eccezionale alfabetizzazione degli abitanti di Deir el-Medina è dovuta senza dubbio al fatto che gli artigiani specializzati avevano bisogno di comprendere i geroglifici per poter lavorare nelle tombe reali. I sepolcri dei faraoni scavati all'inizio della storia del villaggio contenevano solo semplici copie delle guide all'oltretomba, scritte in caratteri corsivi e accompagnate da vignette con figure estremamente stilizzate. Ma alla fine del XIV secolo a.C. nelle tombe cominciano ad apparire scene molto elaborate, incise e dipinte. Nello stesso tempo, l'alfabetizzazione si diffuse considerevolmente, come è evidenziato dall'aumento del numero di testi scritti durante questo periodo.

Il faraone Horemhab, che regnò dal 1319 al 1292 a.C., fu il primo a volere rilievi dipinti nella propria tomba nella Valle dei re. Gli elaborati progetti di Horemhab e dei faraoni successivi richiedevano che un gruppo di artigiani specializzati eseguisse i disegni preliminari e il lavoro di pittura finale; dato che i dipinti delle tombe includevano grandi pannelli con testi geroglifici, gli esecutori dovevano saper leggere e scrivere.

Forse più sorprendente è il fatto che almeno alcuni degli operai incaricati del compito erculeo di scavare le tombe nel fianco della montagna non erano analfabeti, sebbene il loro lavoro non richiedesse simili capacità. Forse era l'ambizione a motivare questi lavorato-

Una lezione di letteratura egizia

L'ostrakon qui mostrato reca un brano di un'opera poetica, *Satira dei mestieri*, che è un classico della letteratura egizia del Medio Regno. In essa viene descritta una varietà di occupazioni, come quelle del tessitore, del fabbricante di frecce e del messaggero, che l'autore considera inferiori all'onorevole professione di scriba. Lo studente che realizzò questa copia evidentemente non conosceva bene la lingua arcaica dell'opera - scritta oltre 700 anni prima - e la sua trascrizione del testo è confusa e inesatta. Alla fine della lezione, lo studente scrisse la data con inchiostro rosso.

Media Services, Hunterian Museum, Università di Glasgow

Brano originale

Il corriere va nel deserto,
dopo aver trasmesso ai figli i suoi beni,
per timore dei leoni e degli Asiatici;
ritorna in conoscenza quando è di nuovo
[in Egitto;
quando arriva a casa sua di sera,
[lo ha spossato il viaggio.
Sia pur la sua casa di tela o di mattoni,
[ritorna contento.

da *Letteratura e poesia dell'antico Egitto*, trad. di Edda Bresciani, Einaudi, Torino 1969.

Copia dello studente

Il corriere va nel deserto,
dopo aver trasmesso ai figli i suoi beni,
per timore [dei] leoni e Asiatici;
che cos'è quand'è in Egitto?
Quando arriva a casa sua tormentato,
[lo ha diviso il viaggio.
Mentre esce [dalla] sua tela [o]
[mattone,
egli non verrà contento.

Terzo mese della stagione d'inverno, giorno 1

Medelhavsmuseet, Museum of Mediterranean and Near Eastern Antiquities, Stoccolma

Questo esempio dei cartigli di Amenhotep I è stato eseguito con mano sicura dall'insegnante su un lato dell'ostrakon (*a sinistra*). Lo studente ha poi voltato il frammento e ha fatto una copia dell'esempio (*a destra*), rovesciando alcuni dei segni.

ri: in Egitto l'istruzione e l'alfabetizzazione erano le chiavi per una buona carriera, erano ciò che separava la classe degli artigiani da quella dei contadini; la capacità di leggere e scrivere avrebbe aperto molte strade nel caso il lavoro della costruzione di tombe fosse venuto a mancare. Inoltre la cultura dell'apprendimento nel villaggio potrebbe essere stata un incentivo assai forte, capace di incoraggiare i giovani a studiare per stare alla pari con i loro coetanei.

Gli egittologi hanno ricavato molte preziose informazioni dagli ostraka trovati a Deir el-Medina, ma purtroppo si sa ancora ben poco su come gli abitanti del villaggio effettivamente imparassero a leggere e a scrivere. I testi egiziani del Nuovo Regno si riferiscono incidentalmente alle scuole, indicando solo che esistevano e che venivano frequentate da bambini abbastanza piccoli. Per esempio, un racconto scoperto a Deir el-Medina descrive le esperienze scolastiche del protagonista, un ragazzo la cui madre non è sposata:

Egli fu mandato a scuola e imparò a scrivere molto bene. Si esercitò in tutte le arti militari e superò i suoi compagni più grandi che erano a scuola con lui. Allora i compagni gli dissero: «Di chi sei figlio? Tu non hai un padre!». E lo insultavano e si prendevano gioco di lui: «Ehi, tu non hai un padre!».

Ma gli studiosi non sono in possesso di prove dell'esistenza di una vera e propria scuola a Deir el-Medina: i testi non fanno alcun riferimento a un edificio scolastico, non è stata portata alla luce alcuna costruzione che assomigli a un'aula, né è stato rinvenuto alcun gruppo di documenti con compiti di studenti che possano permettere di individuare la posizione di una struttura dedicata all'insegnamento. Di fatto, non sappiamo nulla su come i figli degli artigiani imparassero i primi rudimenti del leggere e dello scrivere.

Museo egizio, Università di Lipsia

I forni per la panificazione si trovavano nelle zone destinate alla preparazione dei cibi, situate dietro le case di Deir el-Medina. In questo schizzo, le parole «*Soffiare nel forno*» sono tracciate a sinistra della figura.

Alcuni degli ostraka ci danno invece un quadro un poco più completo di ciò che si potrebbe chiamare istruzione superiore. Molti dei documenti ritrovati nel villaggio sono chiaramente esercizi per studenti non principianti, e talvolta sono firmati con i nomi di studente e insegnante. Alcuni testi portano una data che indica la fine della lezione di un giorno; poiché in certi documenti si legge più di una data, sembra che uno studente potesse utilizzare un singolo ostrakon per diverse lezioni.

A giudicare dalle firme sugli ostraka, è chiaro che padri e nonni spesso controllavano i progressi dei figli e dei nipoti, benché occasionalmente un padre - anche se sapeva leggere e scrivere - potesse indirizzare il figlio a un insegnante di rango più elevato per completare la sua istruzione. (Una firma, purtroppo mal conservata, sembra essere quella di una studentessa; almeno una donna, quindi, potrebbe aver ricevuto una istruzione formale.) Gli allievi erano di tutti i ceti sociali, e comprendevano quindi non solo i futuri leader della comunità, ma anche alcuni ragazzi che non si sarebbero mai elevati al di sopra del rango di tagliapietre. Gli insegnanti però appartenevano generalmente a classi più elevate: gli istruttori citati nei testi sono soprattutto scribi, pittori o capomastri.

Sembra che gli studenti dovessero seguire le lezioni nei ritagli di tempo in cui non lavoravano alla tomba, come indicano le date degli ostraka: per esempio, nei testi che includono più date, esse sono sovente separate da diversi giorni; questo dimostra che passava un certo tempo fra una lezione e l'altra, durante il quale sia l'istruttore sia l'allievo erano presumibilmente impegnati nel lavoro. Tuttavia, vi era molto tempo per imparare: gli operai avevano parecchi giorni liberi, soprattutto quando il lavoro nella tomba si avvicinava al completamento, verso la fine del regno di un faraone. Nelle fasi finali della costruzione poteva accadere che essi trascorressero non più di un giorno su quattro nella Valle dei re.

La principale differenza fra il sistema scolastico di Deir el-Medina e quello in uso in altri centri urbani dell'antico Egitto consisteva in chi imparava a leggere e scrivere. Inoltre anche i materiali usati per la scrittura e il tempo disponibile per l'istruzione contrastano con gli usi documentati altrove. I compiti degli studenti rinvenuti in altri siti erano composti su fogli di papiro riciclati - facilmente disponibili per coloro che occupavano cariche ufficiali - e sembrano essere opera di giovani apprendisti che venivano istruiti in vista di un impiego nella burocrazia. Questi studenti seguivano le lezioni quotidianamente e riuscivano a riempire diversi fogli di papiro in una giornata.

Sebbene alcuni aspetti del sistema scolastico di Deir el-Medina si discostassero dal tipico approccio all'istruzione dell'antico Egitto, gli abitanti del villaggio avevano un concetto molto ampio di ciò che doveva essere insegnato e perché. I docenti di questo villaggio operaio istruivano semplici tagliapietra nei giorni liberi dal lavoro, scrivendo su schegge di calcare (il materiale più facilmente reperibile), ma l'oggetto delle loro lezioni erano i grandi classici della letteratura egizia, e il loro obiettivo era quello di infondere saggezza e di garantire una buona carriera. Uno scriba del villaggio si rivolgeva con queste parole a un giovane allievo: «*Impegnati fortemente nell'imparare a scrivere, perché questa è una professione utile a chi la svolge. Tuo padre conosceva i geroglifici, e tutti lo onoravano quando passava per la via*».

Istituto francese di archeologia orientale, il Cairo

L'abbozzo di un ritratto regale eseguito da uno studente su questo ostrakon è stato corretto in bianco dall'insegnante. A Deir el-Medina i giovani studiavano individualmente con un tutore che li istruiva nel leggere, nello scrivere e nella cultura generale.

ANDREA G. McDOWELL ha iniziato i suoi studi su Deir el-Medina mentre preparava la specializzazione in storia antica all'Università della Pennsylvania. È stata assistente di egittologia alla Johns Hopkins University prima di trasferirsi alla Yale University, dove attualmente studia giurisprudenza. Sta inoltre preparando un libro su Deir el-Medina che dovrebbe essere pubblicato nel corso dell'anno.

Letteratura e poesia dell'antico Egitto, traduzione a cura di Edda Bresciani, Einaudi, Torino 1969 (per le poesie qui riportate).

ČERNÝ JAROSLAV, *A Community of Workmen at Thebes in the Ramesside Period*, Istituto francese di archeologia orientale, il Cairo, 1973.

JANSSEN JAC. J., *Commodity Prices from the Ramessid Period: An Economic Study of the Village of Necropolis Workmen at Thebes*, E. J. Brill, Leida, 1975.

BIERBRIER MORRIS, *The Tomb-Builders of the Pharaohs*, British Museum Publications, Londra, 1982.

MELTZER EDMUND S. (a cura), *Letters from Ancient Egypt* (traduzione di Edward F. Wente), Scholars Press, 1990.